

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**CAIQUE DA SILVA**

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE DE REVESTIMENTOS DE Zn-Ni  
ELETRODEPOSITADOS COM PARTÍCULAS DE  $Al_2O_3$**

**PONTA GROSSA**

**2021**

**CAIQUE DA SILVA**

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE DE REVESTIMENTOS DE Zn-Ni  
ELETRODEPOSITADOS COM PARTÍCULAS DE Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**

**Evaluation of Wear Resistance of Zn-Ni Coatings Electrodeposited With Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
Particles**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química, do departamento de Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Marcos Eduardo Sorares.

**PONTA GROSSA**

**2021**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**CAIQUE DA SILVA**

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE DE REVESTIMENTOS DE Zn-Ni  
ELETRODEPOSITADOS COM PARTÍCULAS DE Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Química, do Departamento  
de Engenharia Química da Universidade Tecnológica  
Federal do Paraná (UTRPR).

Data da aprovação: 17 de novembro de 2021

---

Marcos Eduardo Soares  
Doutor em Engenharia Mecânica  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Erica Roberta Lovo da Rocha Watanabe  
Doutora em Engenharia Química  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Simone Delezuk Inglez  
Doutora em Química  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**PONTA GROSSA  
2021**

## **AGRADECIMENTOS**

Pessoas maravilhosas poderiam ser referenciadas nesse momento, das quais concomitantemente me ajudaram cada uma com sua parcela de apoio, porém, se sobressai a luta incansável de minha mãe em poder proporcionar-me cada degrau de evolução como ser humano, a ela, minha imensa gratidão. Paralelamente, a fé, que me fortaleceu nos momentos mais difíceis, todo agradecimento ao universo e a Lei Mística.

Assim como agradeço ao meu pai, que sempre se esforçou em poder acompanhar meus resultados e me incentivou ao longo de toda graduação.

Amigos e professores que tanto estimo. Muito obrigado por simplesmente existirem e me incentivarem a ir sempre mais além. Assim como a Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, que com toda sua estrutura sempre forneceu uma gama enorme de possibilidades para ampliar os conhecimentos nas mais diversas áreas de estudo.

“Escreva uma nova página hoje, mais uma vez!  
Uma vez mais, e de novo, escreva algo inédito e  
com profundo significado em sua vida.  
Definitivamente, escreva hoje também uma  
página de esplêndido triunfo”.

Daisaku Ikeda

## RESUMO

A grande evolução tecnológica verificada atualmente pode ser proporcionalmente relacionada com o aumento do uso de metais aplicados nos mais diversos setores industriais, sendo os mecanismos corrosivos e desgastes abrasivos exemplos de fatores capazes de causar uma deterioração bastante severa em todo material contendo componentes metálicos. Assim, surge a necessidade de se aprofundar os estudos para protegê-los contra a corrosão e o desgaste, aumentando sua durabilidade e melhorando suas propriedades mecânicas, corrosivas e tribológicas. Utilizando a eletrodeposição de ligas Zn-Ni, seus resultados foram avaliados em função da variação da concentração de material compósito disposto no banho eletrolítico, nesse caso óxido de alumínio (alumina  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Para então, verificar se realmente ocorreu a inserção do compósito na matriz metálica da liga no substrato (nesse caso aço-carbono AISI 4340), além de analisar qual valor aproximado de sua concentração apresenta resultados significativamente superiores das propriedades mecânicas comparados à liga depositada sem a inserção da alumina no banho. Na degradação dos metais, os mecanismos de desgaste apresentam um dos mais importantes meios de deterioração, sua verificação neste trabalho foi realizada por meio da análise morfológica do revestimento aplicado com o ensaio de tribologia (mediante o uso de um tribômetro), o ensaio de microdureza knoop e a caracterização por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) na seção transversal do revestimento. Foi observado um comportamento adverso ao esperado, dado que as amostras eletrodepositadas na concentração de  $75 \text{ g L}^{-1}$  quando analisadas por EDS não apresentaram alumina em seu revestimento. Conforme o aumentou-se a concentração de alumina no banho houve um aumento proporcional na dureza e conseqüentemente os maiores deslocamentos estão em função desse aumento na dureza do revestimento.

**Palavras-chave:** Eletrodeposição. Ligas Zn-Ni. Alumina. Desgaste.

## ABSTRACT

The great technological evolution verified nowadays can be proportionally related to the increase in the use of metals applied in the most diverse industrial sectors, being the corrosive mechanisms and abrasive wear examples of factors capable of causing a very severe deterioration in every material containing metallic components. Thus, there is a need for further studies to protect them against corrosion and wear, increasing their durability and improving their mechanical, corrosive, and tribological properties. Using the electrodeposition of Zn-Ni alloys, the results will be evaluated as a function of the variation in the concentration of composite material in the electrolytic bath, in this case aluminum oxide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  alumina). To then, verify if the insertion of the composite in the metallic matrix of the alloy in the substrate (in this case AISI 4340 carbon steel) really occurred, besides analyzing which approximate value of its concentration presents significantly superior results of the mechanical properties compared to the alloy deposited without the insertion of alumina in the bath. In the degradation of metals, the wear mechanisms present one of the most important means of deterioration, its verification in this work will be carried out through the morphological analysis of the coating applied with the tribology test (using a tribometer), the knoop microhardness test and the characterization by Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) on the cross section of the coating. An adverse to the expected behavior was observed, since the electrodeposited samples at the concentration of  $75 \text{ g L}^{-1}$  when analyzed by EDS did not present alumina in their coating. As the concentration of alumina in the bath increased, there was a proportional increase in the hardness, and consequently the greater debondings are a function of this increase in the coating hardness.

**Keywords:** Electrodeposition. Zn-Ni alloys. Alumina. Wear.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b> - Esquema de eletrodeposição.....	24
<b>Figura 2</b> - Modelo de incorporação de partículas em revestimentos compostos.....	29
<b>Figura 3</b> - Vista lateral do tribômetro e desenho esquemático do cabeçote.....	32
<b>Figura 4</b> - Amostra cortada para ser embutida.....	36
<b>Figura 5</b> - Moldes previamente embutidos.....	37
<b>Figura 6</b> - Lixadora utilizada, modelo APL 4D.....	38
<b>Figura 7</b> - Projeto de célula eletroquímica.....	39
<b>Figura 8</b> - Tribômetro utilizado no ensaio de tribologia.....	44
<b>Figura 9</b> - Microscópio utilizado, modelo B50F5.....	44
<b>Figura 10</b> - Equipamento utilizado para medir a Microdureza Knoop do revestimento aplicado.....	45
<b>Figura 11</b> - Mapeamento EDS e leitura MEV da amostra de 0 g L <sup>-1</sup> de alumina no banho eletrolítico.....	46
<b>Figura 12</b> - Mapeamento EDS e leitura MEV da amostra de 25 g L <sup>-1</sup> de alumina no banho eletrolítico.....	47
<b>Figura 13</b> - Mapeamento EDS e leitura MEV da amostra de 50 g L <sup>-1</sup> de alumina no banho eletrolítico.....	48
<b>Figura 14</b> - Mapeamento EDS e leitura MEV da amostra de 75 g L <sup>-1</sup> de alumina no banho eletrolítico.....	48
<b>Figura 15</b> - Visualização microscópica da trilha (a) e centro (b) com revestimento de 0 g L <sup>-1</sup> de alumina.....	52
<b>Figura 16</b> - Visualização microscópica da trilha(a) e centro(b) com revestimento de 25 g L <sup>-1</sup> de alumina.....	53
<b>Figura 17</b> - Visualização microscópica da trilha (a) e centro (b) com revestimento de 50 g L <sup>-1</sup> de alumina.....	53
<b>Figura 18</b> - Visualização microscópica da trilha (a) e centro (b) com revestimento de 75 g L <sup>-1</sup> de alumina.....	54



## LISTA DE GRÁFICOS

- Gráfico 1** - Média da espessura ( $\mu\text{m}$ ) do revestimento em função da concentração ( $\text{g L}^{-1}$ ) de alumina no banho de deposição. ....49
- Gráfico 2** - HK por concentração [C] de alumina aplicada no revestimento. ....51

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1</b> - Classificação dos tipos de codeposição.....	19
<b>Quadro 2</b> - Descrição das partes do processo de incorporação das partículas na matriz metálica.....	29
<b>Quadro 3</b> - Mecanismos básicos de desgaste.....	31
<b>Quadro 4</b> - Fatores que podem influenciar o teste de microdureza knoop.....	34

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Composição Química (% massa) do aço AISI/SAE 4340.....	36
<b>Tabela 2</b> - Composição do banho de deposição.....	39
<b>Tabela 3</b> - Concentração de Alumina em cada banho.....	40
<b>Tabela 4</b> - D1 e HK lidos no equipamento para cada amostra.....	50
<b>Tabela 5</b> - Média de D1 e HK por ensaio e por concentração [C] de alumina no ensaio.....	51
<b>Tabela 6</b> - Relação entre amostra e largura da trilha de desgaste causada pelo pino no ensaio de tribologia.....	55
<b>Tabela 7</b> - Médias da largura da trilha por ensaio e concentração [C] das amostras.....	55
<b>Tabela 8</b> - Relação entre concentração [C] de alumina com o coeficiente de desgaste.....	56

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVO GERAL .....</b>	<b>16</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>16</b>
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>17</b>
<b>3.1</b>	<b>Eletrodeposição.....</b>	<b>17</b>
<b>3.2</b>	<b>Eletrodeposição de ligas .....</b>	<b>18</b>
<b>3.2.1</b>	<b>Codeposição Anômala .....</b>	<b>19</b>
<b>3.3</b>	<b>Eletrodeposição de Zinco e suas ligas.....</b>	<b>21</b>
<b>3.4</b>	<b>Revestimentos compósitos .....</b>	<b>26</b>
<b>3.5</b>	<b>Ensaio de Desgaste / Ensaio de Tribologia.....</b>	<b>30</b>
<b>3.6</b>	<b>Ensaio de Microdureza Knoop .....</b>	<b>33</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>36</b>
<b>4.1</b>	<b>Amostra .....</b>	<b>36</b>
<b>4.2</b>	<b>Preparo da célula eletroquímica .....</b>	<b>38</b>
<b>4.3</b>	<b>Banho de Eletrodeposição .....</b>	<b>39</b>
<b>4.4</b>	<b>Tempo de deposição.....</b>	<b>40</b>
<b>4.5</b>	<b>Massa atômica media.....</b>	<b>41</b>
<b>4.6</b>	<b>Massa de eletrodepósito (g) .....</b>	<b>41</b>
<b>4.7</b>	<b>Corrente elétrica.....</b>	<b>42</b>
<b>4.8</b>	<b>Tempo de deposição.....</b>	<b>42</b>
<b>4.9</b>	<b>Ensaio de Tribologia .....</b>	<b>43</b>
<b>4.10</b>	<b>Ensaio de Microdureza Knoop .....</b>	<b>45</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>46</b>
<b>5.1</b>	<b>EDS / MEV .....</b>	<b>46</b>
<b>5.2</b>	<b>Ensaio de Microdureza Knoop .....</b>	<b>49</b>
<b>5.3</b>	<b>Ensaio de Tribologia .....</b>	<b>52</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>57</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>58</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com o passar dos anos, o homem conseguiu grande evolução tecnológica em um curto período, paralelamente a essa evolução vem surgindo uma problemática envolvendo todos os materiais com partes metálicas, observando um descarte cada vez mais rápido desses metais por não possuírem resistência mecânica apreciável ou durabilidade devido aos desgastes corrosivos.

Além do descarte, os problemas causados pelo desgaste corrosivo de metais levantam grande preocupação para a humanidade, pois como ressalta Queiroga (2018, p.1), o estudo da corrosão é a melhor forma de evitar ou até mesmo minimizar, os acidentes devido à corrosão. Tais estudos vêm crescendo e se mostrando importante do ponto de vista tecnológico, econômico e social na preservação da natureza e do homem.

Um dos métodos mais utilizados contra a corrosão é a aplicação de revestimentos, em que se observa na maioria das vezes uma deposição de ligas metálicas na superfície do substrato (nesse caso o aço), também podem ser obtidos materiais compósitos em revestimentos metálicos por meio da eletrodeposição.

Thurber (2016, p.84) relata que a utilização mais antiga de compósitos eletrodepositados ocorreu na década de 1920, aplicando revestimentos de Cu-grafite em rolamentos automotivos. Porém, a partir dos anos 2000, o foco das aplicações de eletrodeposição mudou para componentes elétricos e dispositivos eletrônicos. Atualmente, a indústria automobilística e aeronáutica ainda utiliza o revestimento de liga Zn-Ni na proteção de diversas peças fabricadas em aço em larga escala. Isso porque como ressaltado por Silva (2001, p.1), para o revestimento de aço-carbono utiliza-se principalmente metais como zinco, estanho, níquel, cádmio, cobre e alumínio. Esse tipo de revestimento tem vasta aplicação em setores tecnológicos nas indústrias de petróleo, aeronáutica, automobilística, química, entre outras.

O revestimento proporciona uma melhora sensível nas propriedades mecânicas do metal aplicado, no sentido de proteger o substrato, observando uma otimização na conformabilidade, soldabilidade, adequação a pintura, além da adesão ao substrato de aço. Apesar de se obterem excelentes resultados na proteção contra a corrosão destes componentes ainda existem problemas causados pelo desgaste do revestimento devido ao atrito provocado entre duas peças com

movimentos relativos entre si. Desta forma, este projeto tem como objetivo apresenta grande importância nessa pesquisa, atentando ao fato de tentar diminuir os desgastes de peças metálicas em contato e em movimentos conseqüentemente. A deposição de ligas metálicas com a inserção de partículas duras tenta inibir os desgastes corrosivos presentes nessa particularidade, além dos estudos da otimização de revestimentos metálicos frente a outros processos de deposição com as mesmas características sem a presença de tais partículas duras.

São utilizados na eletrodeposição das ligas Zn-Ni, eletrólitos de origem ácida ou básica, sendo que os banhos alcalinos apresentam maiores vantagens na preparação do revestimento com melhor dispersão, menor custo, espessura mais uniforme e faixa de corrente mais ampla. Sperb (2001, p.7) diz que processos alcalinos tendem a apresentar uma baixa eficiência catódica e conseqüentemente, exibem uma distribuição do depósito muito boa, acima da densidade normal de corrente.

Entretanto, Bates (1994, p.36) afirma que revestimentos de ligas Zn-Ni produzidos em banhos ácidos protegem o substrato até cinco vezes quando comparado ao zinco convencional. Sperb (2001, p.7) também afirma que o processo ácido tem uma vantagem adicional de ser capaz de depositar sobre aços endurecidos e ferros fundidos.

Pode-se observar também que uma das formas de se melhorar a resistência ao desgaste destes revestimentos é a inclusão de partículas cerâmicas na camada, formando os revestimentos compósitos.

Segundo Mahidashti (2017, p.1) a incorporação de partículas duras no interior da matriz metálica melhora a resistência ao desgaste através do aumento da ductilidade da matriz na área de contato, alteração da direção do crescimento de grãos para direções mais empacotadas e aumentar a dispersão e refinamento de grãos.

De maneira análoga o coeficiente de atrito diminui com a inserção de partículas duras. Dentre as opções de materiais compósitos com a inserção de partículas duras no revestimento, será dado foco ao óxido de alumínio, chamado de alumina (fórmula molecular  $Al_2O_3$ ). Além disso, Mahidashti (2017, p.1) confirma que as partículas de lubrificante fornecem um comportamento antiabrasivo superior por causa da sua natureza não pegajosa.

Para Póvoa (2018, p.31) a alumina, devido as suas propriedades vem sendo muito pesquisada nas últimas décadas com o objetivo de utilizá-la como matriz de compósitos. Propriedades essas que, como ressalta Badarulzaman (2009, p.604) se destacam como preço baixo, boa estabilidade química, alta microdureza e resistência ao desgaste em alta temperatura.

Pretende-se então com esta pesquisa verificar a possibilidade de incorporação de partículas duras de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  em revestimentos de Zn-Ni eletrodepositados para aumentar a resistência ao desgaste destes revestimentos sem alterar suas propriedades de resistência à corrosão. Nesse sentido, busca-se avaliar a proteção superficial de peças de aço em que ocorrem contatos destas com outras peças metálicas em movimentos entre si.

## **2 OBJETIVO GERAL**

Analisar a influência na resistência ao desgaste na incorporação de partículas duras de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) em revestimentos de Zn-Ni eletrodepositados sobre substrato de aço (AISI 4340).

### **2.1 Objetivos específicos**

- a) Produzir os revestimentos de Zn-Ni eletrodepositados com e sem partículas duras de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ;
- b) Caracterizar os revestimentos obtidos através da técnica de MEV/EDS (Microscopia Eletrônica de Varredura / Espectroscopia de Energia Dispersiva) com análise da seção transversal;
- c) Avaliar as trilhas de desgaste por microscopia ótica;
- d) Avaliar propriedades mecânicas dos revestimentos através de ensaios de microdureza.
- e) Determinar a resistência ao desgaste dos revestimentos através de ensaios de tribologia.



### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Eletrodeposição

A eletrodeposição é o método mais importante para a produção comercial de películas protetoras. Segundo Sousa (2015, p.22) é um processo comumente utilizado, pois se consegue revestimento muito fino e relativamente livre de poros, evitando-se excesso do metal eletrodepositado (SOUSA, 2015, p.22). O processo de eletrodeposição tem como objetivo a deposição de uma camada metálica aderente sobre um substrato metálico visando assegurar propriedades ou dimensões diferentes daquelas do metal base (Menezes et al., 2008, p.18).

Sousa (2015, p.22), diz que os processos de eletrodeposição vêm sendo intensivamente estudados com o objetivo de controlar a microestrutura e composição dos depósitos, visando à otimização de propriedades que melhorem seu desempenho para as diferentes aplicações. Estes depósitos (ou revestimentos) podem ter finalidade decorativa, proteger contra a corrosão, mudar as dimensões do substrato, promover melhores propriedades elétricas e magnéticas, melhorar a soldabilidade, melhorar as propriedades mecânicas visando processos de conformação etc. (Menezes et al., 2008, p.18).

As coberturas por eletrodeposição são de espessuras mais uniformes do que as obtidas por imersão a quente, menos porosas do que as vaporizadas e de maior pureza. O método permite facilmente o controle da espessura da camada depositada (SOUSA, 2015, p.22). A eletrodeposição é uma técnica de grande interesse tecnológico devido ao seu baixo custo e por não utilizar altas temperaturas, além disso, esta técnica permite a deposição de filmes finos em áreas relativamente grandes à temperatura ambiente (BENETTI et al., 2010, p.327).

As correntes dentro do eletrólito provêm da movimentação das espécies iônicas, que pode ocorrer via migração, convecção e difusão, e subsequente oxidação/redução nos eletrodos (SOUSA, 2015, p.23). Outra vantagem da eletrodeposição é a possibilidade de se obter filmes homogêneos com composição, aderência ao substrato, morfologia e espessuras controlando-se parâmetros como concentração, potencial aplicado e temperatura (BENETTI et al., 2012, p.327).

De acordo com a lei de Faraday para a eletrólise, a quantidade de todos os elementos liberados no cátodo ou no ânodo durante a eletrólise é proporcional à quantidade de eletricidade que se passa através da solução (SOUSA, 2015, p.23).

### **3.2 Eletrodeposição de ligas**

Ao que se refere a eletrodeposição de liga, suas características se assemelham ao processo de eletrodeposição de um único metal, contudo, são necessários cuidados importantes para o controle de processo, tais como a composição do banho, a operação do banho e outras variáveis (substrato metálico, espessura do depósito, tipo de corrente, entre outros) para se garantir uma obtenção de um depósito com propriedades mecânicas melhoradas. Além disso, o campo ficará restrito a soluções aquosas. Indo mais a fundo, Gentil (2012, p.376), afirma que o material a ser protegido (substrato) é colocado como cátodo de uma cuba eletrolítica, onde o eletrólito contém sal do metal a ser usado no revestimento, podendo o ânodo ser também do metal a ser eletrodepositado.

Winand (1994, p.1091) afirma que muitos fatores influenciam a eletrodeposição de ligas metálicas (na densidade de corrente do cátodo, concentração do íon contendo o metal, agitação, temperatura, pH, outros cátions e ânions, complexação, inibidores, substrato etc.). Segundo Ponte (1999, p.13) o momento em que começa a ocorrer a deposição no cátodo resultante de uma diferença de potencial aplicada no banho eletroquímico é chamado de Potencial de Deposição. Cada metal apresenta um valor de potencial diferente por suas próprias características de deposição. No caso de uma eletrodeposição é necessário se atentar quanto a esses valores. Dos quais não podem ser muito distantes comparados entre si, pois influenciarão no surgimento de codeposições anômalas devido a diferença entre eles. Existem diversas formas de se evitar tais codeposições (onde sua definição está descrita mais adiante no texto), sendo recorrente na maioria das vezes a redução do teor do metal mais nobre, diminuindo assim sua concentração e a formação de complexos de alguns componentes da solução.

Tendo como base os potenciais de redução padrão do níquel e do zinco de -0,250 V e -0,763 V respectivamente, não será necessário a aplicação de métodos

para a redução da diferença de potenciais dos metais, pois estes apresentam valores relativamente próximos, facilitando assim todo processo de deposição.

### 3.2.1 Codeposição Anômala

No caso de eletrodeposição de ligas deve-se analisar a possibilidade da codeposição dos metais. A codeposição de dois metais A e B ocorre a velocidades apreciáveis quando em uma determinada densidade de corrente os potenciais de redução de dois metais se igualam (QUEIROGA, 2018, p.3).

Como destacado por Kieling (1997, p.135), a formação de ligas metálicas caracterizada por eletrodeposição, possui preferencialmente a deposição de alguns metais frente a outros presentes no banho, esse fenômeno é chamado de codeposição anômala. Higashi (1990, p.4), afirma que na descarga simultânea de diferentes íons metálicos cujos potenciais de equilíbrio não diferem muito um do outro, o metal mais nobre é geralmente depositado preferencialmente devido à maior força motriz para sua deposição, assim entendendo-se que ela ocorre de maneira desigual a redução dos metais. Sabendo que ocorre a precipitação ou adsorção mais elevada de Zinco, o qual se deposita preferencialmente quando comparado ao eletrólito Níquel, pois seus potenciais de redução padrão são menores, lembrando que Zinco é o metal menos nobre a ser depositado.

Queiroga (2003, p.3, apud Brenner 1963) classificou o processo de eletrodeposição de ligas em cinco classes distintas de codeposição, considerando a composição do depósito, o Quadro 1 apresenta resumidamente esses tipos.

**Quadro 1 - Classificação dos tipos de codeposição.**

<b>Tipo de codeposição</b>	<b>Descrição da classe</b>
<b>Codeposição regular</b>	Ocorre quando o processo está sendo controlado por difusão. A porcentagem do metal mais nobre eletrodepositado é aumentada pela diminuição da densidade de corrente, elevação da temperatura, aumento da concentração total do metal e agitação.
<b>Codeposição irregular</b>	Controlada em maior extensão pelo potencial de ativação do que pelo fenômeno de difusão. A codeposição ocorre geralmente em soluções contendo íons complexos.

<b>Codeposição de equilíbrio</b>	Deposição a partir de uma solução que está em equilíbrio químico com os metais eletrodepositados. Este sistema é o único em que a razão molar dos íons metálicos no banho é igual à razão dos metais no eletrodepósitos.
<b>Codeposição anômala</b>	Deposição onde o metal menos nobre é depositado preferencialmente. Esta característica ocorre somente sob condições bem determinadas de concentração e variáveis de operação.
<b>Codeposição induzida</b>	Deposição de ligas contendo metais como molibdênio, tungstênio ou germânio. Estes metais não podem ser eletrodepositados na forma metálica individualmente, mas se depositam formando ligas com metais do grupo do ferro.

**Fonte: Adaptado de Queiroga (2003, p.3).**

Roventi (2000, p.173) descreve que muitas tentativas foram feitas para explicar a codificação anômala das ligas, mas ainda não existe uma teoria universalmente aceita. Continuando, Dutra (2012, p.1) afirma que uma indicação razoável para a eletrodeposição anômala é causada pela cinética lenta de níquel e pela evolução de hidrogênio no depósito de níquel, embora essa interação entre níquel, zinco e hidrogênio não sejam ainda muito claras e várias hipóteses diferentes são relatadas.

De maneira mais específica Tomachuk (2015, p.29), reitera que no cátodo, o metal menos nobre é preferencialmente reduzido, neste caso, o zinco. Existem, no entanto, condições experimentais, como densidade de corrente muito baixa e altas temperaturas, nas quais a codeposição se torna normal, com grande aumento no conteúdo do metal mais nobre. Contudo, tal fenômeno pode ser corrigido com a adição de alguns aditivos, dentre eles agentes complexantes, capazes de otimizar o processo por sua obtenção melhorada.

A modificação de parâmetros como densidade de corrente, a concentração de íons metálicos e a alteração da composição das soluções fazem com que seja induzida a codeposição, mesmo no caso em que os potenciais reversíveis sejam diferentes (QUEIROGA, 2003, p.3).

Na utilização de agentes complexantes ocorre uma inibição no processo de codeposição, neste caso do Níquel. Isso se deve ao fato de formar uma sub-monocamada (dissolução de frações da monocamada) de Zinco, explicado pela presença do hidróxido de Zinco na região muito próxima do eletrodo, com um pH ideal (após a formação de gás hidrogênio) para a formação do hidróxido. Robotin

(2013, p.2384), afirma que quanto menor for o valor do pH do banho eletrolítico, maior será o aumento da reação de evolução de hidrogênio e conseqüentemente maior será a diminuição da eficiência de corrente. Além disso, o aumento do pH na superfície do cátodo é capaz de induzir a precipitação do hidróxido de zinco, que inibe a descarga de níquel (ROVENTI, 2000, p.173).

O hidróxido de zinco adsorve preferencialmente na superfície do cátodo retardando a deposição do níquel, mas favorecendo a deposição do zinco (SOARES, 2001, p.23).

Tomachuk (2015, p.29) também conclui que essa codeposição é causada principalmente por dois fatores: o efeito do potencial de eletrodo na deposição de fase  $\alpha$  e  $\gamma$  da liga Zn-Ni a partir de um mesmo eletrólito e, a influência do zinco depositado na polarização para eletrodeposição do níquel.

### **3.3 Eletrodeposição de Zinco e suas ligas**

A aplicação de revestimentos em ligas de aço, sendo principalmente zinco e suas ligas, são utilizadas na intenção de proteger o substrato através do mecanismo de proteção catódica sacrificial. Sendo utilizado em larga escala devido ao baixo custo do processo e suas propriedades, das quais podem variar de acordo com as características dos processos de eletrodeposição. O processo de eletrodeposição do zinco produz revestimentos com melhor aspecto decorativo, constituído de zinco puro e sem camada intermetálica, como no caso da imersão à quente, e com isso permite um melhor controle da espessura (Menezes et al., 2008, p.18).

Assim como se observa uma grande vantagem frente à sustentabilidade, pois existe grande importância em preocupar-se com fatores que estão intimamente ligados à saúde humana e uma importância social, afinal, materiais metálicos em seus mais diversos âmbitos estão diretamente relacionados com o ser humano e meio ambiente, dado que processos corrosivos podem acarretar grandes impactos ambientais ou danos à saúde. Queiroga (2003, p.1) afirma que problemas causados pela corrosão de materiais se tornam frequentes em diversos setores da atividade humana (construção civil, automobilística, ferroviária, marítima, odontológica, indústria química etc.) proporcionando grandes gastos econômicos diretos

(substituição e prevenção dos materiais) e indiretos (consequência da corrosão dos materiais).

A propriedade de proteção contra a corrosão do zinco mostra que apesar de apresentar um valor de potencial padrão de redução mais eletronegativo que o aço, o zinco apresenta taxas de corrosão inferiores ao aço em atmosferas naturais (Menezes et al., 2008, p.18).

De maneira geral, pode-se dizer que exista diversos efeitos das variáveis de deposição, resultando em uma interferência nos valores finais da liga depositada, além de variação na composição e alteração de suas propriedades mecânicas. Dentre estes efeitos, existe a necessidade de os potenciais de deposição serem valores o mais próximos possível. Na deposição de dois metais simultaneamente a diferença de potencial precisa de uma interpretação mais criteriosa, assim como citado por Soares (2001, p.6), os metais devem apresentar seus potenciais de deposição bastante próximos, devido ao fato que metais mais nobres depositam preferencialmente. Em geral, com completa exclusão do metal menos nobre.

Barbano (2010, p.94) afirma que a utilização de agentes complexantes é bastante comum em banhos de deposição, pois a formação de complexos permite a obtenção de eletrodépósitos de melhor qualidade quando comparados com aqueles obtidos através de uma solução de sal simples. Além disso, os agentes complexantes são instrumentos para minimizar a diferença entre os potenciais de redução dos íons metálicos de interesse, otimizando a codeposição dos metais.

Na tentativa de proteger os metais, a aplicação de proteção superficial pela eletrodeposição de ligas metálicas apresenta resultados cada vez melhores, segundo Tomachuk (2015, p.26), atualmente os dois principais processos usados para aplicação de revestimentos a base de zinco são: imersão a quente e eletrodeposição. Outros processos menos utilizados são: aspersão térmica (metalização), sherardização e revestimento por tinta rica em zinco. De acordo com a espessura do revestimento, geometria da peça, aparência final e outros fatores, pode-se então escolher o método de aplicação desejado. Logo, Queiroga (2003, p.2) afirma também que, as coberturas por eletrodeposição são de espessuras mais uniformes do que as obtidas por imersão a quente, menos porosas do que as vaporizadas e de maior pureza. O método permite facilmente o controle da espessura da camada depositada.

Além disso, nos últimos anos a aplicação da eletrodeposição de ligas tem aumentado devido as propriedades conferidas ao metal, tais como resistência à abrasão, dureza, condutividade elétrica, refletividade, soldabilidade, entre outros (SILVA, 2001, p.1). Essas ligas são aplicadas nas mais diversas áreas, como por exemplo, nas indústrias químicas, petrolíferas, navais, de construções civis e automobilísticas em decorrência de algumas características especiais, como alta resistência à corrosão e desgaste.

Continuando, Queiroga (2003, p.2) afirma que a eletrodeposição é o processo pelo qual um revestimento metálico é aplicado sobre uma superfície através de uma corrente elétrica, geralmente contínua. A deposição pode ser feita em superfície condutora (metais e ligas metálicas: aço carbono, latão) ou não condutora (plásticos, couro, madeira).

De acordo com Menezes et al. (2008, p.18), o mecanismo de corrosão do zinco pode ser exemplificado através das principais reações eletroquímicas responsáveis pela corrosão do zinco em meios naturais, que são:

Reação anódica:



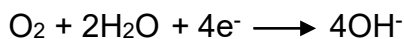
Reações catódicas:



(meios muito ácidos ou fracamente ácidos, neutros e alcalinos desaerados);



(meios fracamente ácidos aerados);



(meios neutros e alcalinos aerados).

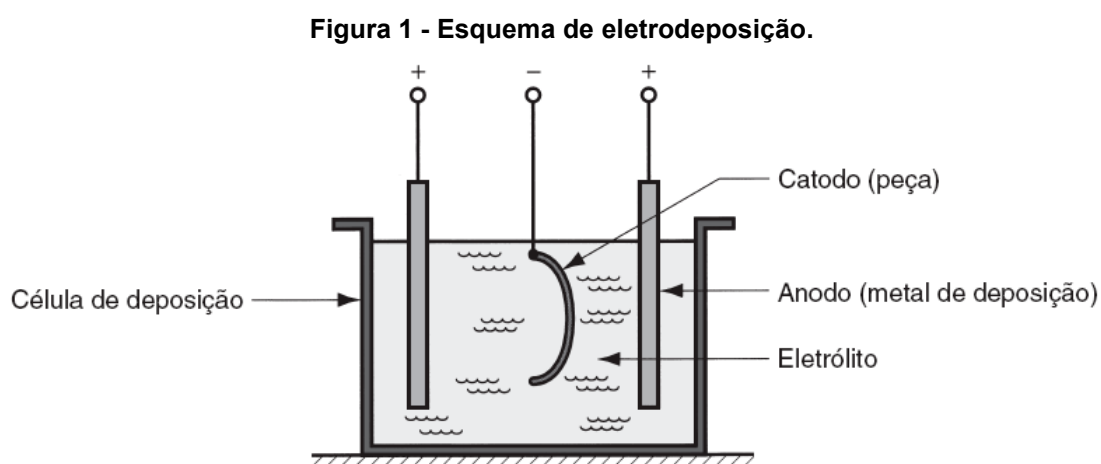
O processo de eletrodeposição é, essencialmente, uma reação eletroquímica que ocorre na área catódica da célula eletroquímica para produzir depósitos sólidos na superfície de substratos (TOMACHUK, 1998, p.2). Complementando, Queiroga (2003, p.2) confirma que a formação dos depósitos está associada com reações de oxirredução de espécies químicas (na reação de

oxidação a espécie perde elétrons, tornando-se mais positiva, e na reação de redução recebe elétrons, tornando-se mais negativa).

Uma vantagem à eletrodeposição de ligas Zn-Ni é sua utilização por se conseguir um revestimento muito fino e relativamente livre de poros, evitando-se excesso do metal eletrodepositado (QUEIROGA, 2003, p.2).

Importante ressaltar que das variáveis de deposição, é necessário se atentar em quesitos importantíssimos antes, durante e depois do processo, porém, no que se refere ao durante, o tempo de revestimento é diretamente proporcional a todo resultado esperado da eletrodeposição. Não restrito a esse, isso se aplica a todos os processos de revestimento que usam a eletrólise como aplicação. De maneira análoga Queiroga (2003, p.2) afirma que de qualquer modo, sob quaisquer condições, a espessura do depósito é proporcional ao tempo de deposição.

O processo de eletrodeposição é tratado por alguns autores como deposição eletroquímica, afinal, trata-se de um processo eletrolítico. Os íons metálicos do eletrólito depositam-se em uma peça polarizada catodicamente através de uma corrente aplicada. O anodo geralmente é feito do metal que está sendo depositado e, portanto, serve como a fonte do metal de deposição. A corrente direta de uma fonte de alimentação externa passa entre o anodo e o catodo (GROOVER, 2017, p.193). De maneira mais explicativa, a Figura 1 demonstra um esquema das partes mais importantes do banho eletroquímico.



As correntes dentro do eletrólito (solução de sais, ácidos ou bases) provêm da movimentação das espécies iônicas, que pode ocorrer via migração, convecção e



difusão, e subsequente oxidação/redução nos eletrodos (QUEIROGA, 2003, p.2). Groover (2017, p.193) afirma, na maioria dos metais de deposição, nem toda a energia elétrica no processo é usada para deposição. Parte da energia pode ser consumida em outras reações concomitantes, como a liberação de hidrogênio no catodo e isso reduz a quantidade de metal depositado.

Estudos confirmam que existe um teor de zinco aproximado do ideal para a obtenção de revestimento por eletrodeposição em ligas de Zn-Ni, pois estes apresentam resultados melhores nos ensaios de corrosão através de seu recobrimento de sacrifício. Segundo Soares (2001, p.29, apud Park, 1998) quando o conteúdo de níquel ultrapassa os 18%, o eletrodepósito deixa de atuar como um recobrimento de sacrifício.

Pedroza (2012, p.2927) cita que o conteúdo de Ni entre 10 e 15% em peso apresenta melhor resistência à corrosão em comparação com amostras com maior teor de Ni. Assim, será considerado o padrão de níquel com 15% e o restante de zinco no teor adicionado ao banho para a representação quantitativa dos cálculos respectivamente.

A temperatura possui também grande importância na deposição da liga, sendo que, para Soares (2001, p.34) a composição e morfologia dependem da concentração de aditivos e da temperatura. Como um efeito geral estes aditivos alisam o depósito e refinam o tamanho de grão. Assim como o aumento de temperatura do banho provoca um aumento da quantidade de níquel no depósito, um aumento na temperatura de deposição sempre melhora a resistência à corrosão da liga, mas este efeito é maior quando acompanhado por um significativo aumento na % de níquel na liga (SILVA, 2001, p.34).

A aplicação de revestimentos em ligas traz benefícios de grande importância no combate aos mecanismos de corrosão, porém, como já abordado, ligas eletrodepositadas de Zn-Ni não apresentam grande resistência ao desgaste quando aplicadas em superfície de peças metálicas com movimentos entre si. Na intenção de diminuir os impactos causados pela ação deste processo, faz-se necessária a inserção de aditivos capazes de inibir ou combatê-lo, com a aplicação apropriada observa-se uma resistência ao desgaste amplamente melhorada. Segundo Fini (2013, p.2914), aumentar a dureza das ligas pela adição de elementos de liga apropriados e a redução do tamanho de grão da superfície podem melhorar a resistência ao desgaste.

### 3.4 Revestimentos compósitos

Algumas propriedades físicas e mecânicas do revestimento podem ser aumentadas em grande escala por serem incorporados revestimentos compósitos em sua matriz metálica quando comparados aos revestimentos de metal puro, Badarulzaman (2009, p. 603) diz que essas propriedades aprimoradas derivam principalmente da presença de partículas dispersas na matriz metálica e, portanto, dependem do conteúdo e da natureza das partículas nos revestimentos.

Também conhecidos como materiais conjugados ou compostos, são fabricados pela união de dois ou mais tipos de materiais, formando uma estrutura com propriedades mais vantajosas do que as de cada material isoladamente, para determinados usos tecnológicos (DIAS, 2007, p.5 apud Monteiro, 1990).

Sanchez (2009, p.379) diz que o uso de materiais compósitos vem crescendo consideravelmente devido, principalmente, à grande diversidade de propriedades que podem ser exploradas a partir da combinação de dois ou mais materiais de natureza distinta. Menezes et al. (2008, p.16) afirma que revestimentos compósitos obtidos por vias química e eletroquímica têm sido objeto de numerosos trabalhos e patentes nas quais aparece uma grande diversidade de associação partículas-matrizes.

Dias (2007, p.5, apud Mano, 1991) diz que os materiais compósitos são materiais heterogêneos, multifásicos, podendo ser ou não poliméricos, em que estes sendo descontínuos, dão a principal resistência ao esforço (componente estrutural), e o outro, contínuo, é o meio de transferência desse esforço (componente matricial). O tipo de partícula a ser introduzida na matriz metálica depende das propriedades requeridas para aplicação já a utilização de materiais compósitos visa à associação de propriedades da partícula juntamente da matriz (MENEZES, 2008, p.22).

O componente estrutural pode ser um material orgânico ou inorgânico, de forma regular ou irregular, fibroso ou pulverulento (esférico ou cristalino), com os fragmentos achatados (como flocos) ou como fibras muito curtas de material monocristalino (DIAS, 2007, p.5).

Dentre os mais variados tipos de revestimentos compósitos, podem ser separados em dois principais grupos, sendo eles: revestimento compósito por partículas ou de matriz polimérica (FILHO, 2009, p.2). No revestimento compósito reforçado por partículas observa-se uma aplicação maior em metais, polímeros e cerâmicas, onde apresenta maior eficácia quando as partículas estão distribuídas ao longo da matriz de maneira igual ou uniforme, além de se observar grande melhora nas propriedades mecânicas da superfície metálica com a inserção do material particulado.

Revestimento compósito reforçado com matriz polimérica são aplicados geralmente em fibras, das quais podem variar entre: fibras de vidro, carbono, entre outras. Das propriedades adquiridas ressaltam elevada resistência à tração e compressão, em matrizes poliméricas apresentam um custo menor, resistência química elevada, além de existir muitas variações de aplicação de acordo com a necessidade do projeto de interesse.

O revestimento com partículas cerâmicas em fibras poliméricas traz uma combinação de características bastante significativas. Sanchez et al. (2009, p.379) afirma que este tipo de revestimento conserva a flexibilidade e a elasticidade intrínseca dos polímeros e agregam propriedades vantajosas típicas dos materiais cerâmicos, como a resistência à abrasão, ao desgaste, à chama, ou mesmo a ação bactericida e/ou fotocatalítica.

Representando uma particularidade no grupo de misturas poliméricas imiscíveis os compósitos apresentam características importantes frente ao revestimento metálico, segundo Dias (2007, p.5) esses componentes não se dissolvem, mas atuam concertadamente, sendo as propriedades do conjunto superiores às de cada componente individual. São formados por elementos de reforço em grau variável de ordenação, que se distribuem em uma matriz flexível.

Antes de garantir o aumento das propriedades físicas e mecânicas da inserção de compósitos na matriz, deve se atentar ao conhecimento e controle dos parâmetros eletroquímicos de todo o processo. Menezes (2008, p.30) continua, as propriedades dos revestimentos compósitos dependem dos parâmetros eletroquímicos como densidade de corrente, potencial de eletrodeposição etc.

Ligas metálicas contendo Zn-Ni estão sendo eletrodepositadas como revestimentos sacrificiais e empregadas na proteção de peças de aço (automobilística e afins) contra corrosão. Contudo, constantes observações são

feitas no intuito de otimizar ainda mais tais processos, tal qual a inserção de partículas duras (como a Alumina) para alcançar resultados mais satisfatórios em todo revestimento frente à ataques corrosivos, assim como em partes com atrito, onde também é necessária uma camada que resista principalmente ao desgaste e melhorar suas propriedades mecânicas.

Zheng et al. (2007, p.548), afirma que a Alumina tem sido amplamente utilizada em revestimentos compósitos com matriz de metal, devido à sua elevada dureza, resistência ao desgaste e uma excelente estabilidade química.

Pode ser verificado como resultado do aumento da dureza o efeito de endurecimento da dispersão da matriz, ocasionado pela inserção das partículas de alumina na matriz do compósito, além disso Bin-shi (2006, p.710) também afirma que os grãos de alumina alteram as condições de cristalização do revestimento, devido à formação de cristais finos (bloqueando o crescimento do metal na matriz metálica) e aumentando a distribuição de grãos, o que melhora suas propriedades de resistência ao desgaste.

Segundo Praveen (2011, p.1) materiais compósitos possuem propriedades superiores, como endurecimento de dispersão (alta dureza), auto lubrificação, alta resistência à oxidação de temperatura e excelente resistência ao desgaste e à corrosão. A técnica de co-deposição eletroquímica consiste em incorporar partículas (adicionadas intencionalmente ao eletrólito) à matriz metálica durante o processo de eletrodeposição (MENEZES, 2008, p.22).

A incorporação de partículas não condutoras (compósitos) na matriz metálica, pode ser identificado em etapas necessárias para a concluir o processo e separando-as em 5, como sugerido por Celis (1987, p.1403) O Quadro 2 apresenta todas as etapas necessárias para as partículas serem incorporadas por completo no revestimento separadamente. Assim como disse Menezes (2008, p.22) vários autores propuseram modelos com o objetivo de explicar o fenômeno de co-deposição de partículas não condutora durante a formação de um depósito catódico durante a eletrodeposição. Este que será apresentado, traz a versão atualmente mais aceita daquela como real do processo de incorporação.

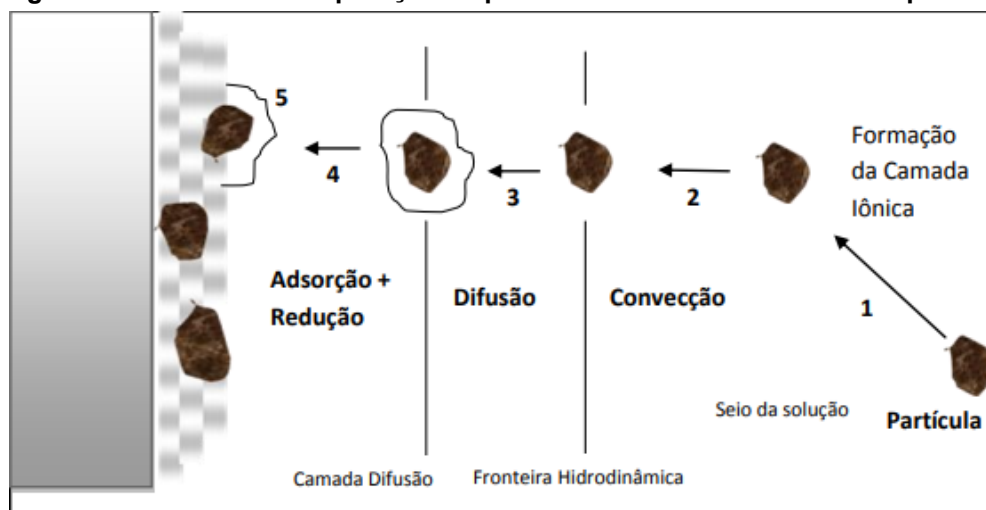
**Quadro 2 - Descrição das partes do processo de incorporação das partículas na matriz metálica.**

Partes da incorporação	Descrição da parte
<b>1ª etapa</b> (formação da camada iônica)	cada partícula no seio da solução é envolvida pela formação de uma dupla camada adsorvida (interações partícula-eletrólito)
<b>2ª etapa</b> (convecção)	as partículas são transferidas por convecção até a fronteira hidrodinâmica
<b>3ª etapa</b> (difusão)	as partículas alcançam a superfície do cátodo por difusão
<b>4ª etapa</b> (adsorção + redução)	no cátodo, íons metálicos livres e adsorvidos sobre as partículas são reduzidos
<b>5ª etapa</b> (depósito)	quando os íons adsorvidos à partícula são reduzidos, a partícula é capturada e incorporada irreversivelmente

Fonte: Adaptado de Torres (2014, p.25).

Partindo da mesma definição desse modelo proposto, pode-se acompanhar de maneira ilustrativa descrevendo suas partes respectivamente. A Figura 2 mostra uma perspectiva diferente o mesmo processo.

**Figura 2 - Modelo de incorporação de partículas em revestimentos compostos.**



Fonte: Menezes, 2008, p.24.

Dentre as diversas propriedades da alumina, pode-se destacar que possui forte ligação iônica interatômica. Ela existe em várias fases cristalinas, as quais se revertem para a fase  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hexagonal, mais estável a temperaturas elevadas. Esta é a fase de particular interesse para aplicações estruturais de engenharia (PÓVOA, 2018, p.32). Porém, vale ressaltar também que de fato, é conhecido que o crescimento de grão acentuado da alumina tem forte interferência (redução) em suas propriedades mecânicas (MINATTO, 2017, p.183).

Concluindo, Póvoa (2018, p.32) diz que a alumina possui uma dureza de 16 a 18 GPa e apresenta uma limitação quanto à aplicação em ferramentas de corte: a sua baixa tenacidade à fratura.

### **3.5 Ensaio de Desgaste / Ensaio de Tribologia**

Segundo Martinez (2004, p.1) o desgaste é uma das formas mais severas de degradação dos materiais. Este é um processo de extrema importância para verificar a degradação de um metal, pois o desgaste representa a maneira física de sua deterioração. Assim, entendendo como dano de uma superfície sólida, diz-se que o desgaste ocorre devido ao movimento relativo entre duas superfícies de contato. Deve-se salientar que essa definição não exclui os fenômenos de danos da superfície sem remoção de material, mesmo que haja apenas deformação plástica, configura-se como desgaste (TREVISAN, 2013, p.24).

Shackelford (2011, p.454) afirma que, especificamente, o desgaste pode ser definido como a remoção de material da superfície por causa da ação mecânica. A quantidade de desgaste não precisa ser grande para ser relativamente devastadora.

A resistência ao desgaste é a habilidade do material de ter uma vida útil relativamente elevada quando submetido aos vários tipos de mecanismos de desgaste: ataque (contato físico direto), desgaste por fusão, oxidação/difusão e plasticidade (DIAS, 2007, p.44, apud Brooks, 1987).

Segundo as referências não há um senso comum na literatura com relação a denominação dos tipos de desgaste (SEPTIMIO, 2019, p.90). Por outro lado, Amorin et al. (2002, p.20) destacaram os tipos de desgaste em 5 diferentes grupos. O Quadro 3 identifica os 5 mecanismos de desgastes diferentes de peças metálicas.

**Quadro 3 - Mecanismos básicos de desgaste.**

<b>Mecanismo de desgaste</b>	<b>Descrição do grupo</b>
<b>abrasivo</b>	Mecanismo de desgaste provocado pelo contato entre uma partícula e um material sólido, promovendo a perda de material pela passagem dessa partícula dura sobre a superfície do material.
<b>adesivo</b>	Ocorre quando duas superfícies que são postas em contato ficam sujeitas às forças interatômicas e intermoleculares nas zonas de contato real (topo das asperidades microscópicas das superfícies)
<b>difusivo</b>	Transferência de átomos de um material para outro, o que causa variações nas propriedades da camada superficial do metal. Este mecanismo é altamente dependente da temperatura e da solubilidade dos elementos presentes na zona de fluxo (zona de cisalhamento secundário)
<b>ação eletroquímica</b>	Pode gerar condições adequadas à ocorrência de uma reação eletroquímica entre as peças. Desta reação, resulta uma camada de baixa resistência ao cisalhamento na superfície do metal, na qual pequenas porções de material são arrancadas
<b>fadiga superficial</b>	Falha superficial devida a carregamentos (tanto mecânicos quanto térmicos) repetidos.

Fonte: AMORIM et al. (2002, p.20) e SEPTIMIO et al. (2019, p.90).

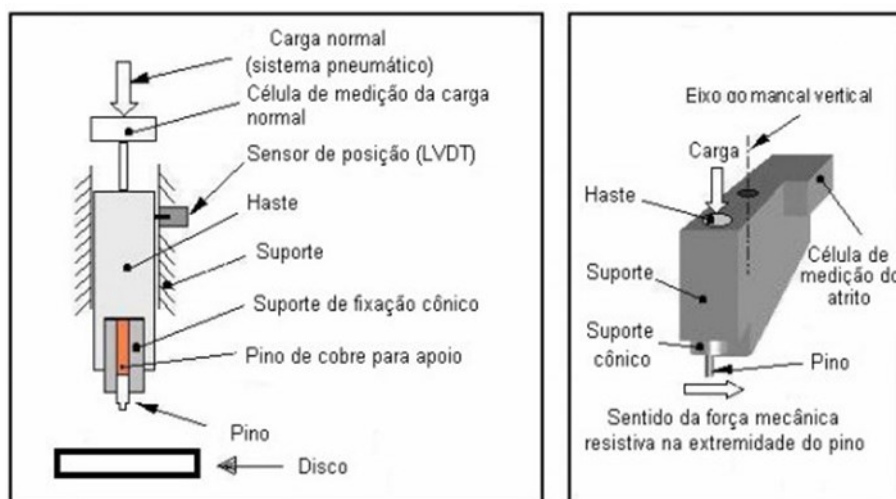
Assim, conhecendo a importância causada por seus impactos e a forma de se inibir, pode-se também quantificar o grau de melhoria oriundo da aplicação do revestimento, ou seja, analisar por meio de gráficos os resultados no combate ao desgaste. Para verificar o nível de deterioração, utiliza-se um tribômetro (equipamento de medição de forças de atrito) em um Ensaio de Tribologia, o qual será abordado como método quantificador na medida do desgaste causado por ação abrasiva de outra peça metálica sob o revestimento aplicado.

A Tribologia é considerada uma ciência multidisciplinar que trata do estudo das interações térmicas, mecânicas e químicas ocorrendo em duas superfícies sólidas em contato quando estão em movimento relativo (SEPTIMIO et al., 2019, p.85).

Silva (2006, p.5) explica que para se obter o comportamento quanto à fluência dos materiais, utiliza-se um tribômetro (neste caso do tipo pino-contra-disco) como equipamento capaz de aplicar uma força constante e de medir as

deformações longitudinais devido a esforços de compressão. Além disso é possível determinar a taxa de desgaste pela medição da variação da profundidade da trilha de desgaste, pela distância percorrida do pino sobre o disco. A Figura 3, apresenta este equipamento da vista em corte e perspectiva, sendo a peça da parte final de medição.

**Figura 3 - Vista lateral do tribômetro e desenho esquemático do cabeçote.**



Fonte: SILVA, 2006.

Os equipamentos projetados para medir e controlar grandezas associadas ao desgaste são chamados de tribômetros (do inglês, tribometers), também conhecidos como tribotesters (TREVISAN, 2013, p.45). O desgaste propriamente dito será medido a partir da retirada do espécime do equipamento para medição de suas dimensões ou de sua massa (TREVISAN, 2013, p.47).

Cabe salientar que a ação tribológica é a denominação atribuída a ação de contato na superfície de um corpo sólido e o movimento relativo de um contra corpo sólido, líquido ou gasoso (CAMPOS JUNIOR, 2017, p.90). Os mecanismos de desgaste estão associados as características tribológicas do sistema (DA SILVA JÚNIOR et al., 2006, p.1).

Para ter os resultados da influência do desgaste sobre o revestimento aplicado, será efetuada a análise utilizando o ensaio de tribologia através do tribômetro. Em que a amostra será submetida a pressões aplicadas pelo equipamento e após isso sua análise de acordo com as deformações no revestimento. Sabe-se que existem vários tipos de equipamentos, e que cada um deles possui uma configuração diferente e estas diferenças se refletem nos resultados; por exemplo, haverá variação de taxa de desgaste em um mesmo



material dependendo do ângulo no qual o carregamento será feito sobre o corpo de prova a ser ensaiado (NETO, 2007, p.2).

Como comentado por Pereira (2010, p.57), para conseguir obter valores em função do desgaste por meio da análise do coeficiente de desgaste específico ( $k$ ), pode-se calcular a taxa de desgaste relacionando as alterações físicas obtidas na superfície depositada após análise do ensaio de microdureza, dado sua representação na equação 2.

$$k = \frac{V}{F \cdot S} \quad (1)$$

$k$  = Taxa específica de desgaste ( $\text{mm}^3/\text{Nm}$ );

$V$  = Volume removido no desgaste ( $\text{mm}^3$ );

$S$  = Distância percorrida (m);

$F$  = Carga aplicada (N).

### 3.6 Ensaio de Microdureza Knoop

Na caracterização de propriedades mecânicas de revestimentos duros, existem métodos de grande precisão, dentre eles o ensaio de microdureza Knoop. Os resultados deste ensaio são relacionados com diâmetro da esfera do penetrador e a amostra analisada, capaz assim de medir com exatidão grandes variações de dureza. O ensaio de microdureza Knoop avalia a resistência à penetração em um material (OLIVEIRA, 2015, p.29).

A precisão está correlacionada diretamente aos fatores que podem influenciar na análise da microdureza, o Quadro 4 mostra as variações no tipo de fator e a descrição de cada:

**Quadro 4 - Fatores que podem influenciar o teste de microdureza knoop.**

<b>Fatores</b>	<b>Descrição</b>
<b>Instrumentais</b>	Precisão da carga aplicada, efeito de inércia, velocidade de carregamento, movimento lateral do penetrador ou da amostra, tempo de intenções, desvios no formato do penetrador, danos ao penetrador, espaçamento inadequado entre recuos ou forma borda, ângulo de indentação
<b>Medição</b>	Calibração da unidade de medida, abertura numérica da objetiva, ampliação, qualidade de imagem inadequada, uniformidade de iluminação, distorção na óptica, acuidade visual do operador, foco da imagem
<b>Materiais</b>	Heterogeneidade da amostra, resistência da textura cristalográfica, se presente, qualidade da preparação da amostra, baixa refletividade, fluência durante a indentação, fratura durante a indentação

**Fonte: Strnad (2014, p.290).**

Segundo Strnad (2014, p.290), no ensaio de microdureza, a profundidade de indentação tem de estar limitada a um máximo de 10% do comprimento diagonal médio do recuo. Este não é um problema para materiais a granel, mas no caso de filmes finos, limita a possível carga a ser aplicada a cargas muito pequenas. Continuando, o autor também ressalta que isso levantou o problema do efeito de tamanho de recuo (ISE) que se refere ao fato de que, em cargas muito baixas, os resultados do teste em um material não são constantes na faixa de cargas de teste.

A microdureza é um teste laboratorial não destrutivo e especificamente localizado, fornecendo dados da distribuição das propriedades do material estudado (SOUZA, 2009, p.28). Por meio da utilização de microscópios de precisão para as medições das indentações (com aumentos de até 500 vezes) é possível medir as marcas geradas no ensaio garantindo exatidão de +0.5 micrometros (Bertol, 2009, p.11).

Dentre as normas e regulamentações que regem os ensaios visando um padrão e otimização de análises de microdureza knoop, Soprano (2007, p.22) afirma que a norma ASTM (Sociedade Americana de Testes e Materiais) E 384-99 propõe, para as medições, que as superfícies dos corpos-de-prova sejam submetidas a cargas de 1gf a 1000gf com tempo mínimo de indentação de 10 a 15 segundos, velocidade entre 15 e 70 $\mu$ m/s e comprimento mínimo de 20 $\mu$ m das diagonais efetuadas pelo microdurômetro.

Segundo Rodrigues (2014, p.167) os valores referentes à escala Knoop podem ser encontrados de acordo com a seguinte equação:

$$KHN = [(14228 c) / (d^2)] \quad (2)$$

Em que:

c = Carga aplicada em gramas;

d = Diagonal maior deixada pela penetração em  $\mu\text{m}$ .

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Amostra

Para o preparo das amostras foi utilizado o aço AISI 4340, cuja sua composição química que está apresentada na Tabela 1. Existem inúmeras particularidades envolvidas, em específico, é um material que combina profundo endurecimento (alta temperabilidade) com alta ductilidade, elevada resistência e razoável tenacidade, além de apresentar boa soldabilidade (BARROS, 2015, p.72).

**Tabela 1 - Composição Química (% massa) do aço AISI/SAE 4340.**

<b>C</b>	<b>S</b>	<b>P</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>
0,39	0,01	0,08	0,23	0,67	0,83	1,73	0,26

Fonte: Rev. Bras. Apl. Vac., Campinas, Vol. 34, N°2, p.71-74, maio - ago., 2015.

A obtenção da amostra foi efetuada através do recorte de barras do aço mencionado, com diâmetro de 20mm e altura de 5mm, a Figura 4 apresenta a amostra após o recorte.

**Figura 4 - Amostra cortada para ser embutida.**

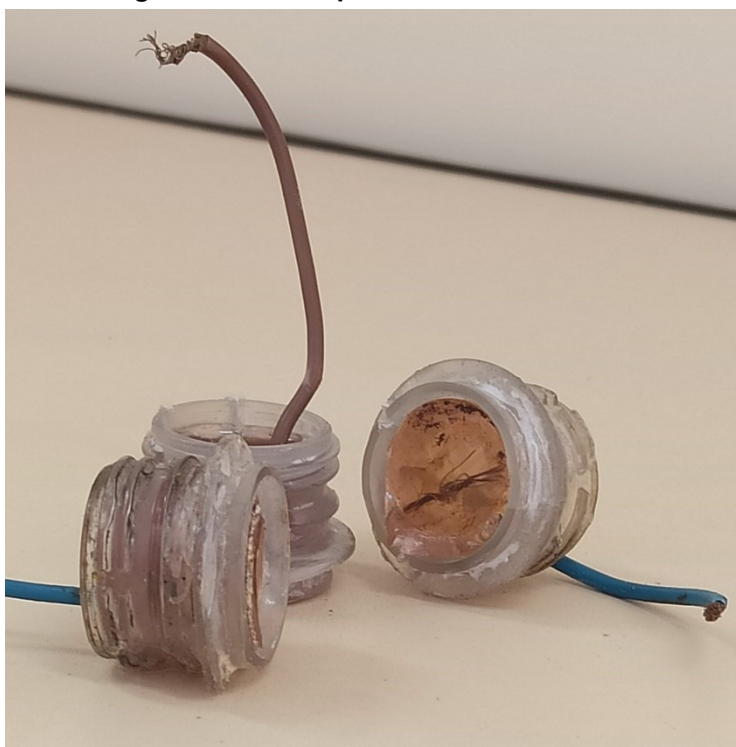


Fonte: Autoria própria.

Faz-se necessário o embutimento do metal para melhores condições de operação e manuseio em seu preparo, para isso, utilizando resina e catalisador pode-se preparar uma peça com diâmetro final de 25mm. Para se obter uma peça

de tamanho padrão como molde de embutimento, utilizou-se tampas de garrafa PET (Politereftalato de Etileno), pois na parte inferior da rosca da garrafa, forma-se um padrão de ângulo retângulo perfeito de 90°, na tentativa de melhor vedar a peça com a célula eletrolítica essa adaptação mostrou certa relevância e fácil repetibilidade. No embutimento foi conectado um fio de cobre na parte interna para garantir a transferência de corrente elétrica e utilizar a polarização adequada na amostra sem a preocupação de ter problemas com mal contato. A Figura 5 ilustra o molde embutido com as conexões para teste de vedação e que em seguida foi utilizado com a amostra também embutida.

**Figura 5 - Moldes previamente embutidos.**



**Fonte: Autoria própria.**

Após isso, foi realizado um acabamento superficial através do lixamento, com lixas de granulação 220, 320, 400 e 600 respectivamente, para obter uma superfície lisa. Em seguida, seu polimento com alumina 1  $\mu\text{m}$ . Após o tratamento superficial da amostra foi efetuada a limpeza com acetona e algodão, seguido de ataque químico com ácido sulfúrico de baixa concentração (10% de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) por aproximadamente 10 segundos. A Figura 6 apresenta a lixadeira utilizada para obter melhores resultados no processo de preparo da amostra.

Figura 6 - Lixadeira utilizada, modelo APL 4D.



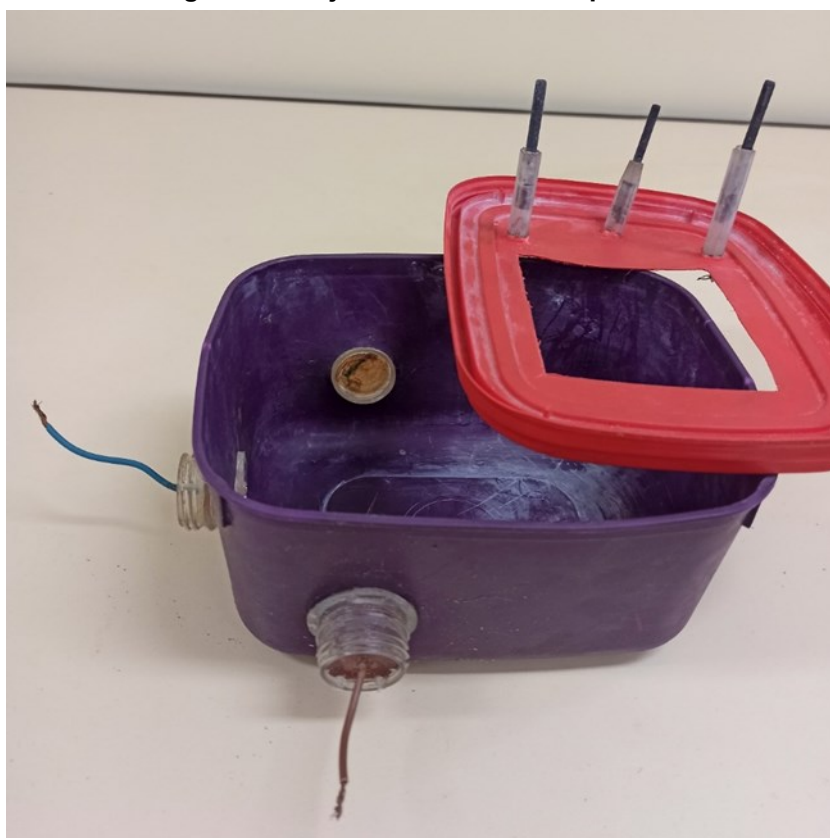
Fonte: Autoria própria.

#### 4.2 Preparo da célula eletroquímica

Em um recipiente plástico retangular com 3 perfurações em suas paredes laterais de dimensões 15x22x15 cm (altura, comprimento e profundidade respectivamente) foi elaborado a célula eletroquímica, pensando nas condições físicas de cada eletrodeposição e seu controle de volume. Os ânodos, devido o interesse de ocorrer uma deposição dos elementos contidos no banho eletroquímico, foram bastões de carbono (material inerte) ficados por cima da cuba eletrolítica (tampa).

Uma pequena bomba de fluxo constante foi utilizada para manter a agitação da solução. A Figura 7 ilustra como foram posicionadas as amostras na célula eletroquímica.

**Figura 7 - Projeto de célula eletroquímica.**



Fonte: Autoria própria.

### 4.3 Banho de Eletrodeposição

A Tabela 2 identifica a composição do banho de deposição utilizado.

**Tabela 2 - Composição do banho de deposição.**

Reagente	Formula molecular	Concentração (g L <sup>-1</sup> )
Cloreto de Níquel hexahidratado	NiCl <sub>2</sub> 6H <sub>2</sub> O	34,5
Cloreto de Zinco	ZnCl <sub>2</sub>	38,5
Cloreto de Potássio	KCl	254,44
Ácido bórico	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	20

Fonte: Autoria própria.

Cada um dos reagentes exerce função diferente, sendo que o cloreto de níquel hexahidratado disponibiliza os íons de necessários de níquel, assim como o cloreto de zinco faz com seus íons. Já o cloreto de potássio melhora a condutividade da eletrodeposição e o ácido bórico exerce função de tampão, o qual apresenta

grande influência frente à sua capacidade tamponante, Silva (1999, p.405) afirma que a capacidade tamponante é uma indicação da quantidade de ácido ou base que pode ser adicionada antes do tampão perder sua habilidade de resistir à mudança de pH. Outros fatores importantes a considerar são a temperatura (nesse caso ambiente) e o pH (5,5).

Os eletrodepósitos foram obtidos a partir de 4 banhos, com a composição básica mencionada, diferenciados na concentração de partículas duras de  $Al_2O_3$  com tamanho médio de 1  $\mu m$ . A Tabela 3 apresenta os valores referentes à concentração de Alumina em cada banho.

**Tabela 3 - Concentração de Alumina em cada banho.**

Descrição do banho	Concentração de $Al_2O_3$ ( $g L^{-1}$ )
Banho 1	0
Banho 2	25
Banho 3	50
Banho 4	75

Fonte: Autoria própria.

#### 4.4 Tempo de deposição

Para alcançar uma espessura de revestimento de 25  $\mu m$ , é necessário calcular o tempo de deposição e comparar com o resultado a fim de determinar a eficiência do processo de eletrodeposição. Baseando-se na relação de Faraday (equação 2) é possível efetuar o cálculo.

$$m = \frac{M \cdot i \cdot t}{ZF} \quad (3)$$

Sendo:

m – massa de depósito;

M – massa atômica do material a ser depositado;

i – corrente elétrica aplicada;

t – tempo de deposição;

Z – nº total de elétrons participantes da reação de redução;



F – constante de Faraday (96500 C).

#### 4.5 Massa atômica media

Dentre os valores possíveis de composição de liga, será utilizado uma composição de liga de 15% níquel, pois apresenta melhores propriedades de resistência a corrosão.

$$M_{liga} = \%Zn * M_{Zn} + \%Ni * M_{Ni} \quad (4)$$

Sendo:

%Zn = Porcentagem de Zinco na solução (85%);

MZn = 65,38 g mol<sup>-1</sup> (massa molar do zinco);

%Ni = Porcentagem de Níquel na solução (15%);

MNi = 58,71 g mol<sup>-1</sup> (massa molar do níquel).

Obtendo um valor de Massa Atômica da liga de:

$$M_{liga} = 64,38 \text{ g mol}^{-1}$$

#### 4.6 Massa de eletrodepósito (g)

Como a equação da massa de eletrodeposição depende também da densidade de liga, necessita-se antes encontrá-la para prosseguir com os cálculos. Vale ressaltar que os valores de massa da alumina não entram no cálculo, uma vez não ocorre a redução de seus íons metálicos (como no caso do Ni e do Zi), ou seja, não se dissociam em meio aquoso. Assim:

$$D_{liga} = \%Zn * d_{Zn} + \%Ni * d_{Ni} \quad (5)$$

Dado que:

dZn = 7,13 g/cm<sup>3</sup> (densidade específica do Zinco puro);

$d_{Ni} = 8,91 \text{ g/cm}^3$  (densidade específica do Níquel puro).

Assim a densidade de liga encontrada é:

$$D_{liga} = 7,40 \text{ g/cm}^3$$

Logo, pode-se encontrar a massa de eletrodeposito:

$$m_{dep} = e \cdot A \cdot D_{liga}$$

Onde:

$e = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ cm}$  (espessura depositada);

$A = \pi \cdot D^2 / 4 = 0,1963 \text{ cm}^2$  (área depositada);

Assim:

$$m_{dep} = 0,0036 \text{ g}$$

#### 4.7 Corrente elétrica

Por fim, com a densidade de corrente e a área calcula-se a corrente.

$$i = D_{cor} \cdot A \quad (6)$$

Ao passo que:

$$D_{cor} = 10 \text{ mA/cm}^2 \text{ (Densidade de corrente).}$$

Assim:

$$i = 1,963 \text{ mA} = 0,001963 \text{ A}$$

#### 4.8 Tempo de deposição

Pela equação de Faraday podemos dizer que:

$$t = \frac{m * Z * F}{M * i} \quad (7)$$

Dos quais foram obtidos anteriormente:  $m = 0,0036$  g (massa de eletrodepósito);

$Z = 2$  (número total de elétrons);

$F = 96485,3329$  s\*A/mol (constante de Faraday).

$M = 64,38$  g mol<sup>-1</sup> (massa atômica média);

$i = 0,001963$ A (corrente);

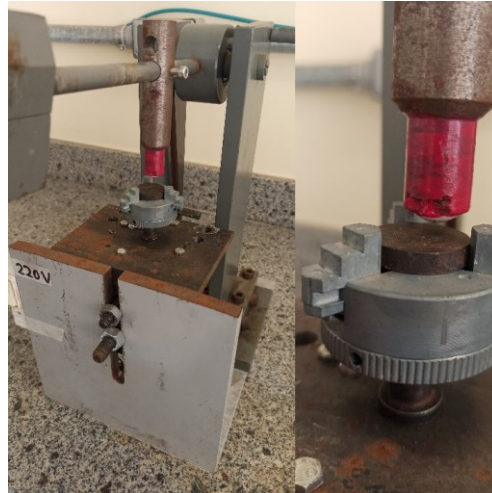
Ao passo que o tempo de deposição é:

$$t = 91 \text{ min}$$

#### 4.9 Ensaio de Tribologia

Com a utilização de um tribômetro (equipamento elaborado pelo professor Dr. Marcos Eduardo Soares) o ensaio foi realizado com os cuidados para a amostra não sofrer impactos e descentrar o metal abrasivo na extremidade do equipamento, ou seja, para o pino não se deslocar e se desviar de seu eixo central consequentemente. Com carga de 220g e velocidade de deslizamento de 5 rpm, pôde-se realizar o ensaio por um tempo de 30 min para cada amostra. A Figura 8 traz o equipamento utilizado ao lado da visão ampliada de seu pino (esfera de alumina com 10 mm de diâmetro) que realizará o ensaio sobre a amostra.

**Figura 8 - Tribômetro utilizado no ensaio de tribologia.**



**Fonte: Autoria própria.**

Foram realizados em 2 ensaios para cada variação da concentração de alumina e 2 amostras do revestimento sem alumina para ter certa comparação com os resultados obtidos, assim, em cada particularidade de amostra, foram analisados os resultados no microscópio de maneira geral e registrado 3 pontos no equipamento para uma análise mais aprofundada.

A constatação do desgaste e sua análise será feita na leitura microscópica do resultado do ensaio, a Figura 9 apresenta o microscópio utilizado para a leitura dos resultados obtidos após o uso do tribômetro.

**Figura 9 - Microscópio utilizado, modelo B50F5.**

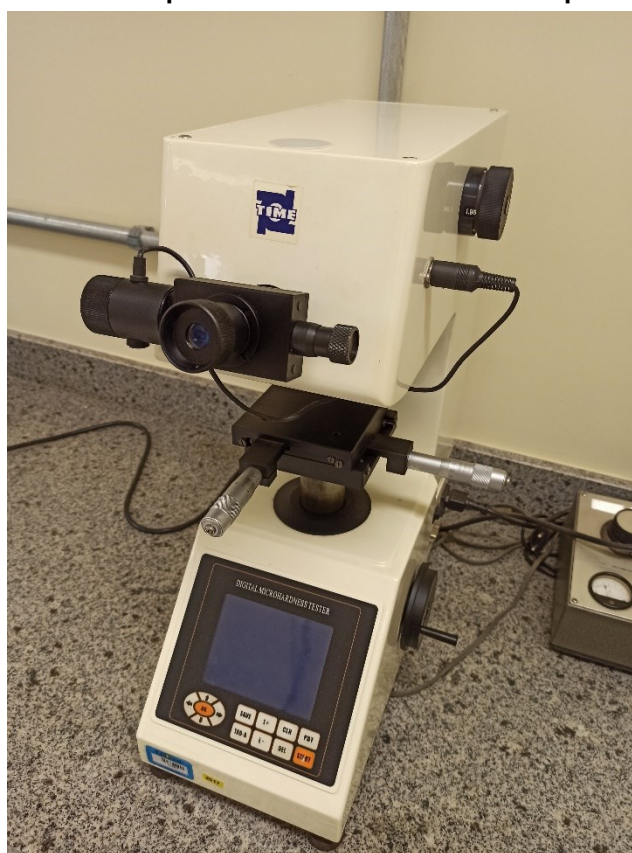


**Fonte: Autoria própria.**

#### 4.10 Ensaio de Microdureza Knoop

Na avaliação da microdureza Knoop, foi utilizado o microdurômetro MHV-1000 (TIME) disponibilizado no Laboratório de Caracterização de Materiais no campus da UTFPR-PG, bloco J. A Figura 10 identifica o equipamento em que foi elaborado o ensaio. Deixando as cargas aplicadas em valores constantes de 1.96N (200g).

**Figura 10 - Equipamento utilizado para medir a Microdureza Knoop do revestimento aplicado.**



**Fonte: Autoria própria.**

O tempo do ensaio também é constante, porém submetido ao aparelho padronizar esse valor (aproximadamente 15 segundos) com o indentador aplicando uma força contra o revestimento.

Todo corpo-de-prova foi submetido à 3 análises em pontos diferentes de sua superfície. Utilizando novamente, 2 amostras de cada variação da concentração do revestimento com e sem alumina, porém com 5 análises para cada amostra.

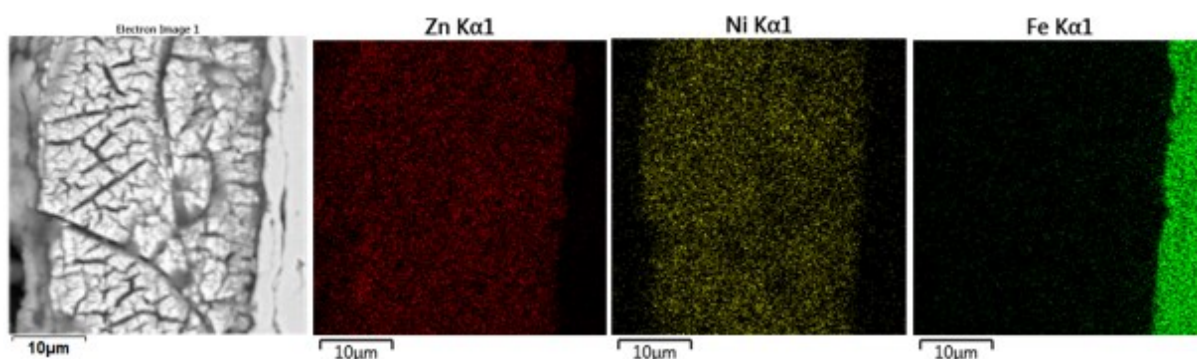
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 EDS / MEV

De forma geral os revestimentos obtidos tiveram uma concentração média de Zn e Ni igual a 67,6% e 16,2% respectivamente, que de acordo com a literatura pesquisada está de acordo com a composição onde estes revestimentos apresentam melhores propriedades.

A Figura 11 mostra a seção transversal do revestimento Zn-Ni na condição  $0,0 \text{ g L}^{-1}$  de alumina. Verifica-se a presença de Zn e Ni no revestimento e Fe no substrato com uma espessura média de  $19,75 \mu\text{m}$ .

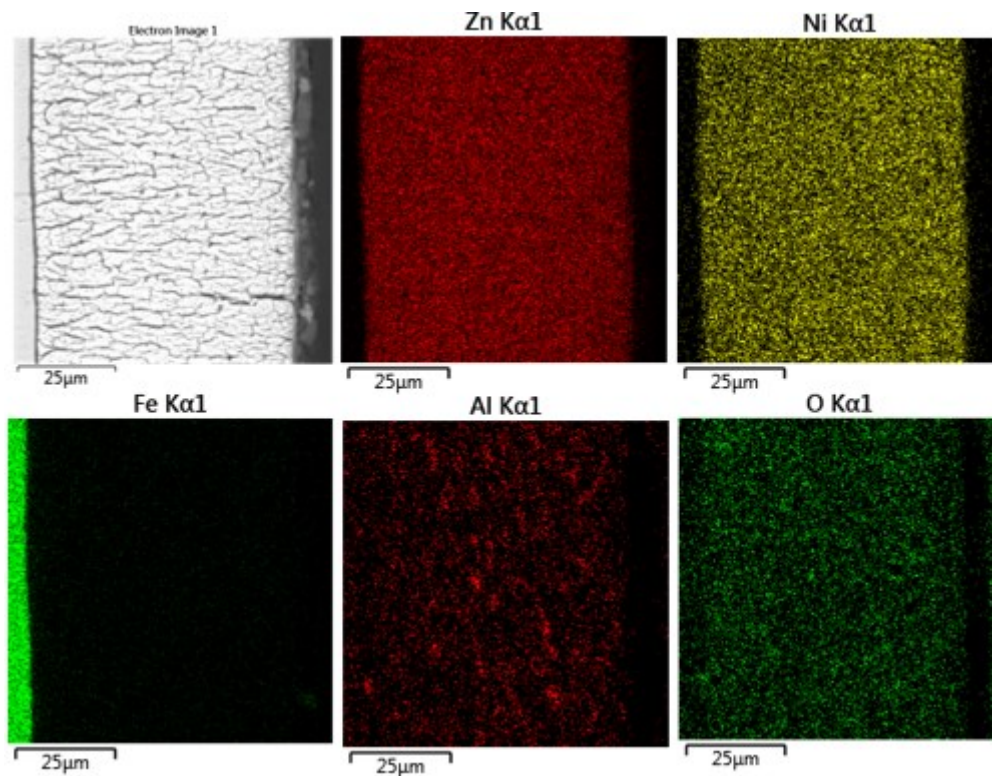
**Figura 11 - Mapeamento EDS e leitura MEV da amostra de  $0 \text{ g L}^{-1}$  de alumina no banho eletrolítico.**



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 12 observa-se uma deposição mais espessa quando submetida a concentração de  $25 \text{ g L}^{-1}$  de alumina no banho, com  $55,39 \mu\text{m}$ . Além da presença de alumínio e oxigênio, revelados por meio da técnica de EDS.

Figura 12 - Mapeamento EDS e leitura MEV da amostra de 25 g L<sup>-1</sup> de alumina no banho eletrolítico.

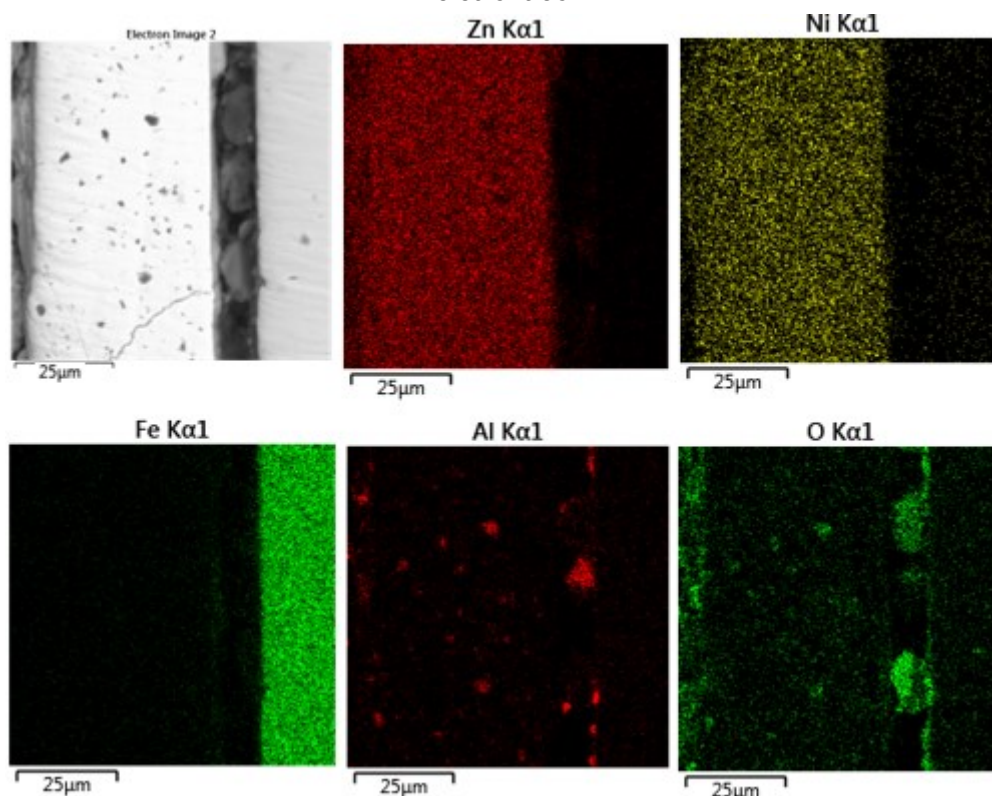


Fonte: Autoria própria.

Na condição de 50 g L<sup>-1</sup> como mostra a Figura 13, a espessura lida no microscópio apresentou valores médios em torno de 22,92 µm, porém foram encontrados valores bastante divergentes entre as superfícies analisadas da mesma concentração no banho (50 g L<sup>-1</sup>) em 2 amostras diferentes, estando uma com espessura menor que 10 µm e outra com resultados acima de 40 µm.



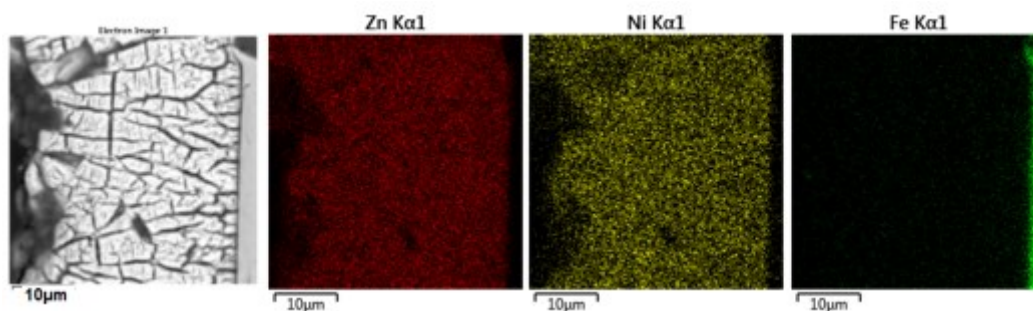
**Figura 13 - Mapeamento EDS e leitura MEV da amostra de 50 g L<sup>-1</sup> de alumina no banho eletrolítico.**



Fonte: Autoria própria.

Seguindo a mesma representação, a Figura 14 identifica a seção transversal da amostra submetida a concentração de 75 g L<sup>-1</sup> de alumina no banho. Esta por sua vez revela uma espessura média de 32,61 μm. Nesta análise em específico, não foi constatada a presença de oxigênio e alumínio, dificultando a verificação da inserção de alumina no revestimento para tal condição.

**Figura 14 - Mapeamento EDS e leitura MEV da amostra de 75 g L<sup>-1</sup> de alumina no banho eletrolítico.**

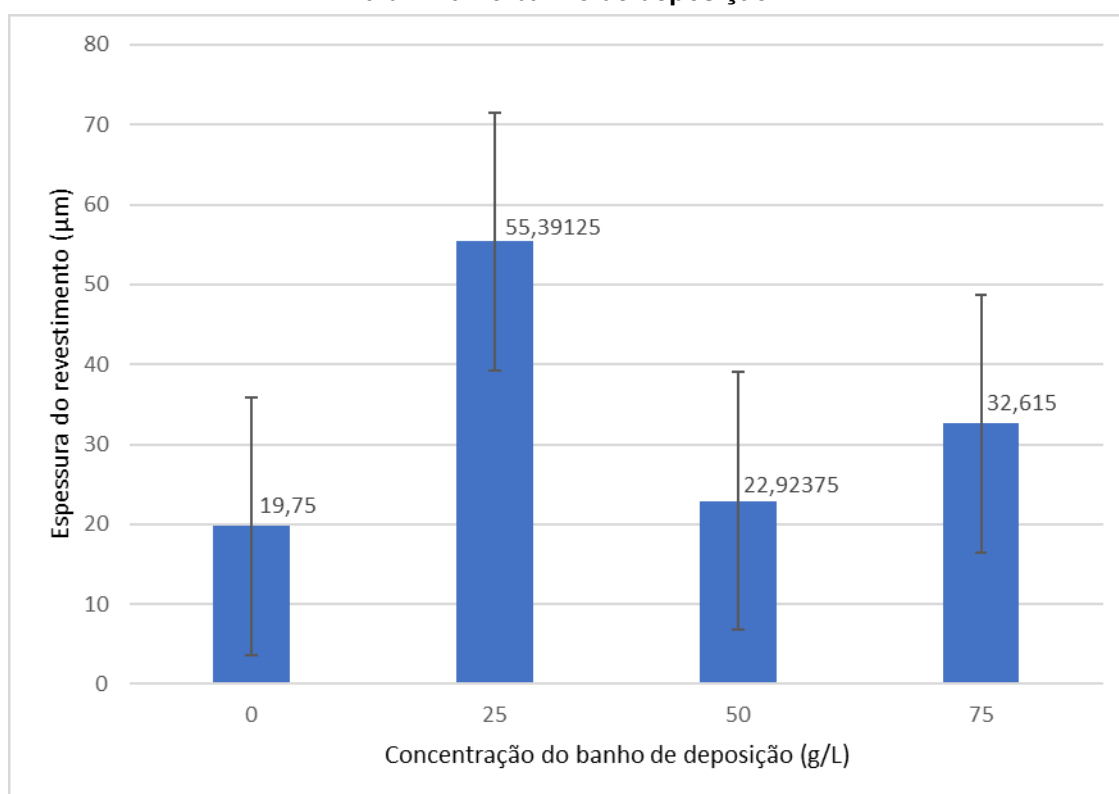


Fonte: Autoria própria.



O Gráfico 1 mostra as espessuras obtidas para diferentes concentrações de alumina no banho. Sendo o de a amostra de 25 g L<sup>-1</sup> de elevados valores, também em função da disparidade entre os resultados obtidos, mas observa-se uma crescente entre as de 50 e 75 g L<sup>-1</sup>, fator esperado segundo a literatura, a concentração do banho de eletrodeposição é um meio de controlar a espessura do revestimento proporcionalmente a sua variação.

**Gráfico 1 - Média da espessura ( $\mu\text{m}$ ) do revestimento em função da concentração (g L<sup>-1</sup>) de alumina no banho de deposição.**



Fonte: Autoria própria.

## 5.2 Ensaio de Microdureza Knoop

Todos os revestimentos apresentaram resultados não tão uniformes após a realização do ensaio. Todas as amostras foram padronizadas identificando um número referente à concentração de alumina presente no banho, seguido do número de cada uma em específico. Realizando 3 banhos para cada concentração foi possível obter os seguintes resultados:

- 3 amostras ausentes de alumina na eletrodeposição (0-1, 0-2 e 0-3 consequentemente);
- 3 amostras com concentração de 25 g L<sup>-1</sup> de alumina na eletrodeposição (25-1, 25-2 e 25-3);
- 3 amostras com concentração de 50 g L<sup>-1</sup> de alumina na eletrodeposição (50-1, 50-2 e 50-3);
- 3 amostras com concentração de 75 g L<sup>-1</sup> de alumina na eletrodeposição (75-1, 75-2 e 75-3).

A Tabela 4 apresenta os resultados das diagonais da impressão (D1) e dureza Knoop (HK) obtidos correlacionando o número do ensaio (5 ensaios por amostra), o número da amostra (o mesmo do ensaio de tribologia, só mudando o de 25 g L<sup>-1</sup>, pois o identificado como 1 nessa concentração, não apresentou resultados significativos, havendo a necessidade da substituição, pois esta já havia sido utilizada no ensaio de tribologia) e a concentração [C] do revestimento.

**Tabela 4 - D1 e HK lidos no equipamento para cada amostra.**

[C] de alumina	nº da amostra	Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		Ensaio 4		Ensaio 5	
		D1	HK	D1	HK	D1	HK	D1	HK	D1	HK
0 g L <sup>-1</sup>	1	36,19	2173,3	38,19	1951,6	31,69	2834,3	40,19	1762,1	43,88	1478,4
	2	36,88	2107,2	32,69	2663,5	38,5	1920	28,25	3566	35,56	2250,3
25 g L <sup>-1</sup>	2	36,75	2107,2	46,63	1509,1	40,13	1767,7	48,19	1225,6	45,88	1352,3
	3	37,5	2030,5	38,5	1920	36,06	2188,3	38	1970,8		
50 g L <sup>-1</sup>	1	29,69	3229	28,19	3581,8	35,75	2226,8	29,13	3355	29,06	3383,9
	2	28,38	3534,6	26,19	4149,7	32,63	2684	33,31	2564,6	29,44	2531,6
75 g L <sup>-1</sup>	1	28,31	3550,2	27,31	3715	26,56	4033,5	27,88	3862,6	25,56	4355,2
	2	40,13	2767,7	34,56	2583,8	31,44	2879,5	27,56	3746	31,88	2801,1

**Fonte: Autoria própria.**

A tabela 5 mostra os valores médios de dureza obtidos para cada condição de obtenção dos revestimentos.

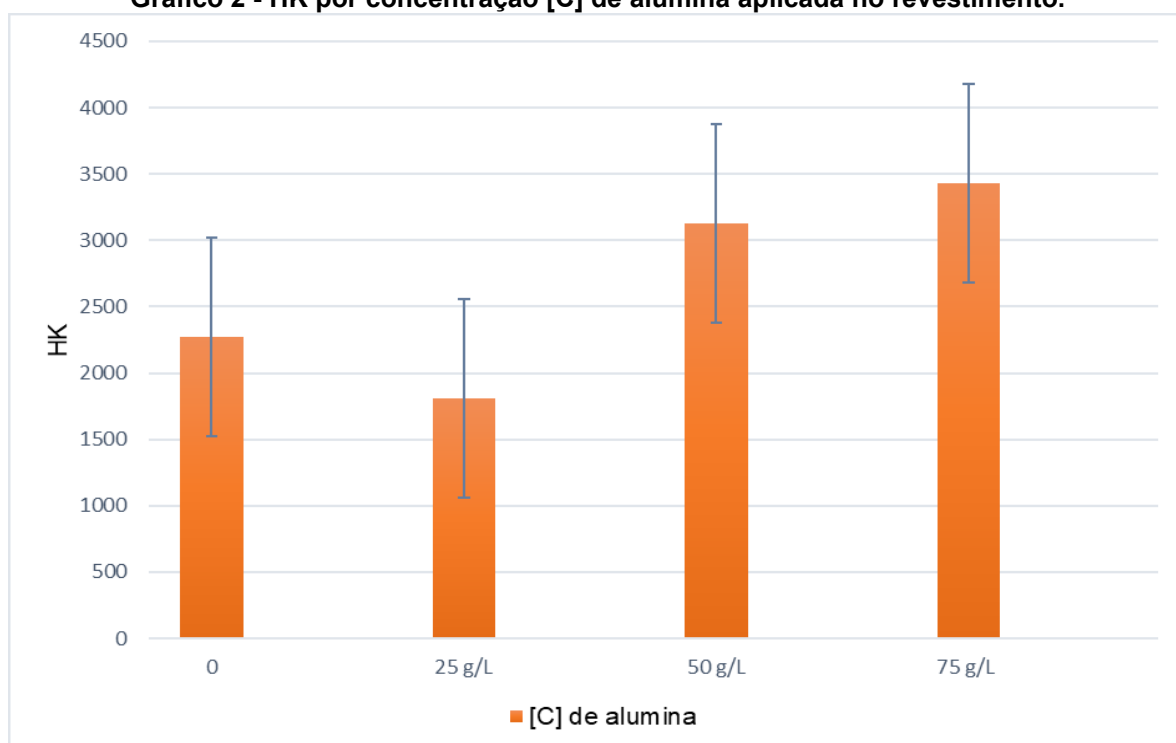
**Tabela 5 - Média de D1 e HK por ensaio e por concentração [C] de alumina no ensaio.**

[C] de alumina	Média da concentração por ensaio		Média final entre D e [C] de amostra	
	D1	HK	D1	HK
0 g L <sup>-1</sup>	38	2040	36	2271
	34	2501		
25 g L <sup>-1</sup>	44	1592	41	1810
	38	2027		
50 g L <sup>-1</sup>	30	3155	30	3124
	30	3093		
75 g L <sup>-1</sup>	27	3903	30	3429
	33	2956		

Fonte: Autoria própria.

O Gráfico 2 identifica os valores dessa última tabela de maneira mais explícita, mostrando apenas as durezas médias de acordo com a variação das concentrações obtidas pelo equipamento.

**Gráfico 2 - HK por concentração [C] de alumina aplicada no revestimento.**



Fonte: Autoria própria.

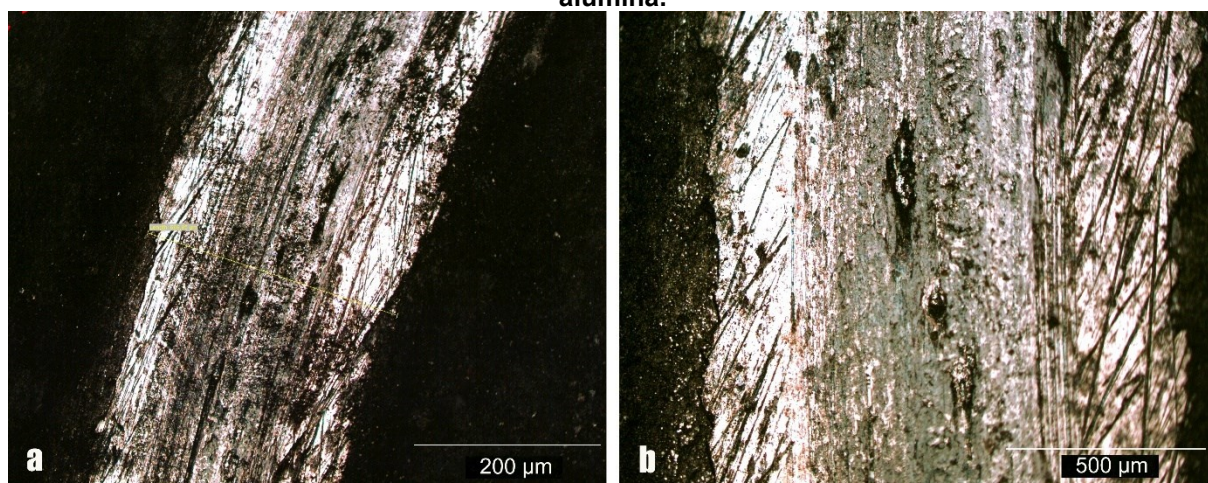
As amostras de 25 g L<sup>-1</sup> de alumina no banho, apresentaram dureza menor que as de 0 g L<sup>-1</sup>, porém as espessuras médias encontradas divergem desse padrão, mostrando que grandes espessuras não são diretamente mais duras. Já quando analisadas entre as de 25, 50 e 75 g L<sup>-1</sup> as durezas foram uniformes e se elevaram proporcionalmente conforme o aumento da concentração de alumina no banho.

### 5.3 Ensaio de Tribologia

As Figuras 15, 16, 17 e 18 trazem as imagens referentes às amostras com concentração de 0, 25, 50 e 75 g L<sup>-1</sup> de alumina respectivamente, relacionando a trilha de desgaste (desgaste causado pelo pino contra o revestimento) e centro da trilha.

Na Figura 15 é possível observar a predominância do mecanismo de desgaste abrasivo na amostra com concentração de 0 g L<sup>-1</sup> de alumina no banho, por causa dos sulcos (ou riscos) deixados no interior das trilhas no sentido do deslizamento, gerados pelo movimento relativo entre o pino e a superfície da amostra.

**Figura 15 - Visualização microscópica da trilha (a) e centro (b) com revestimento de 0 g L<sup>-1</sup> de alumina.**



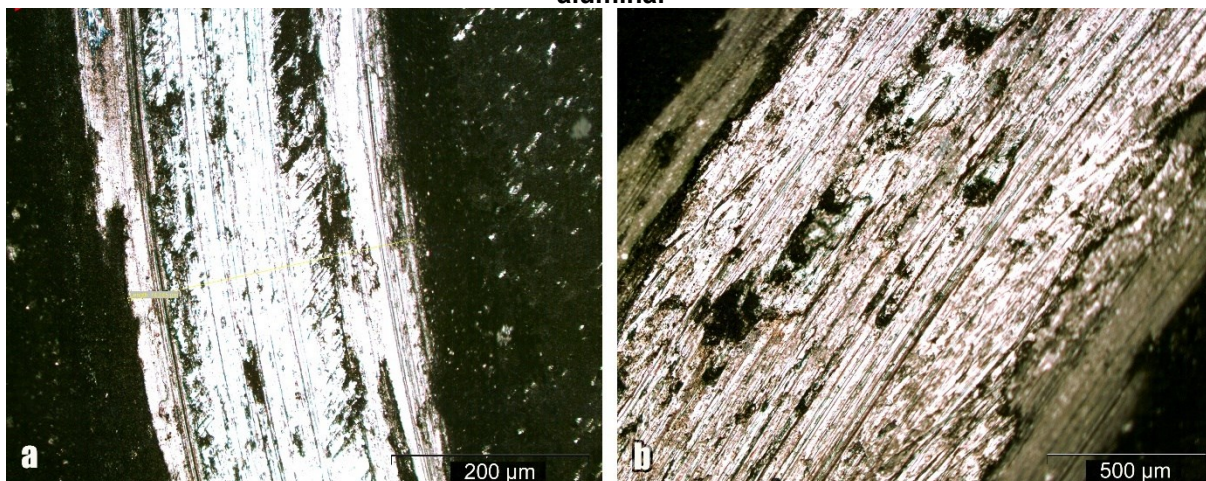
Fonte: Autoria própria.

Na morfologia de desgaste da amostra submetida a concentração de 25 g L<sup>-1</sup> identificada na Figura 16, pode ser observada além de riscos abrasivos,



grande deformação plástica com acúmulo de revestimento de coloração mais escura em quase toda trilha de desgaste. Constatando assim o mecanismo de desgaste adesivo.

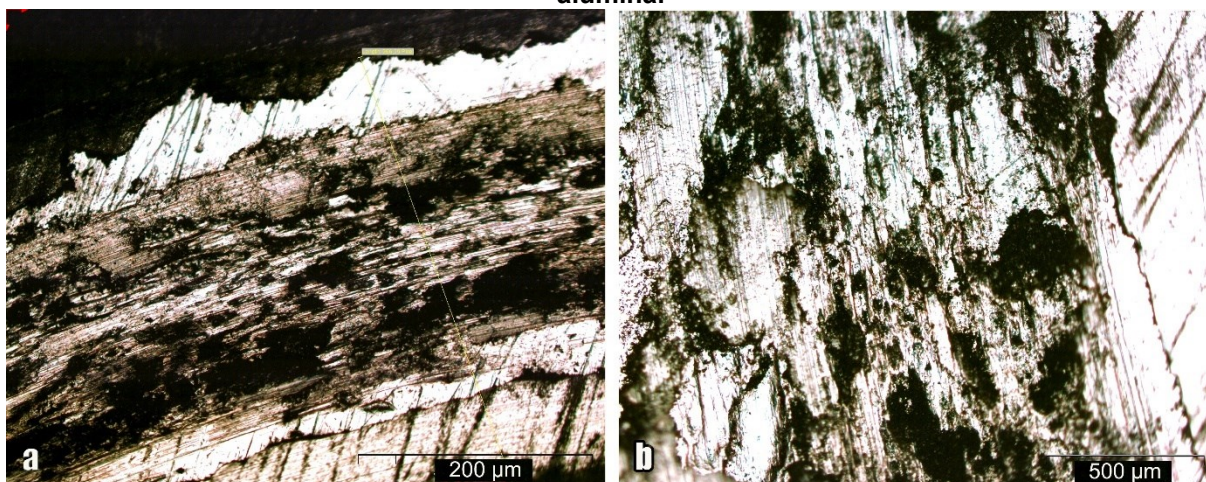
**Figura 16 - Visualização microscópica da trilha(a) e centro(b) com revestimento de 25 g L<sup>-1</sup> de alumina.**



Fonte: Autoria própria.

Para a condição de 50 g L<sup>-1</sup> de alumina no banho como apresentado na Figura 17, observa-se sulcos perpendiculares provenientes do preparo da amostra (lixamento e/ou polimento) não tão adequados para o ensaio, além de sulcos no sentido do deslizamento, configurando também desgaste abrasivo.

**Figura 17 - Visualização microscópica da trilha (a) e centro (b) com revestimento de 50 g L<sup>-1</sup> de alumina.**

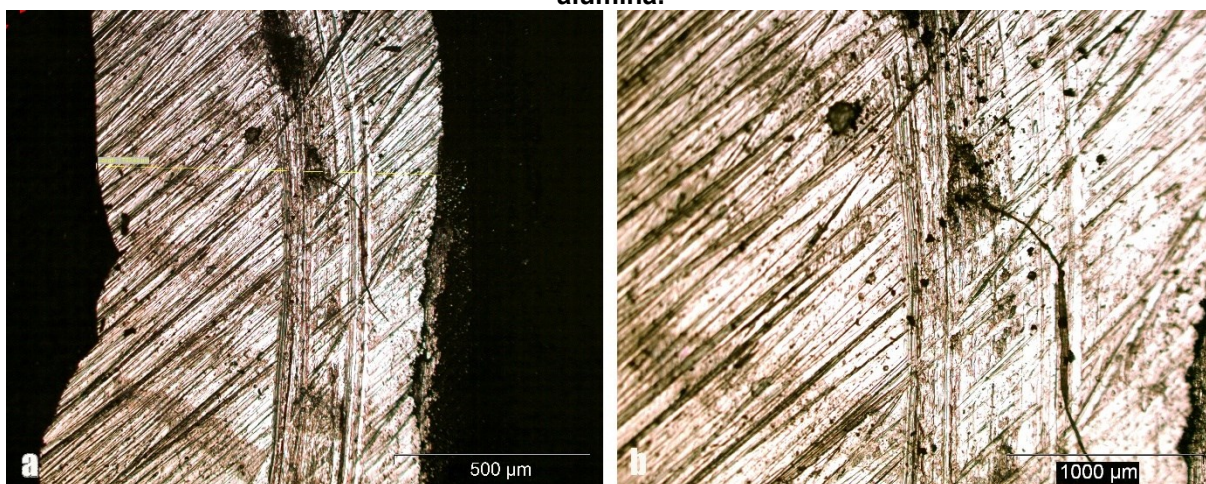


Fonte: Autoria própria.



Dentre as amostras analisadas, a de 75 g L<sup>-1</sup> de alumina no banho eletroquímico apresenta maiores incidências de riscos abrasivos em sua análise morfológica no ensaio de tribologia. Considerando o acúmulo de material nas bordas laterais da trilha de desgaste como observados na Figura 18, percebe-se também a ocorrência de grande deformação plástica, caracterizando assim o desgaste adesivo.

**Figura 18 - Visualização microscópica da trilha (a) e centro (b) com revestimento de 75 g L<sup>-1</sup> de alumina.**



Fonte: Autoria própria.

Sendo as amostras de 50 e 75 g L<sup>-1</sup> de maior concentração de alumina no banho e relacionando ao aumento da dureza no revestimento em função desse aumento de concentração, observa-se nas imagens da trilha de desgaste grande deslocamento na superfície, diferente das amostras de 0 e 25 g L<sup>-1</sup>, pois aumentando a dureza pode favorecer o deslocamento. Confirmando, Marques (2019, p.40) afirma que a aplicação de revestimentos que formam deposição de filmes finos de elevada dureza pode favorecer a diferença entre os módulos de elasticidade com os do substrato, ocasionando falhas de adesão e deslocamento.

A Tabela 6 traz os valores conferidos microscopicamente da largura (L) em unidade correspondente ( $\mu\text{m}$ ) da trilha de desgaste provocada pelo pino. Ressaltando que por causa do grande deslocamento do revestimento na superfície da peça, o corpo-de-prova de número 1 com 25 g L<sup>-1</sup> de alumina no banho, foi substituído pela amostra número 3 de mesma concentração [C], porém, as amostras de 50 e 75 g L<sup>-1</sup> apresentaram deslocamento muito maior, por isso optou-se por avaliar somente até a condição de 25 g L<sup>-1</sup>.

**Tabela 6 - Relação entre amostra e largura da trilha de desgaste causada pelo pino no ensaio de tribologia.**

[C] de alumina	nº da amostra	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
		L ( $\mu\text{m}$ )	L ( $\mu\text{m}$ )	L ( $\mu\text{m}$ )
0 g L <sup>-1</sup>	1	724,68	618,92	668,85
	2	656,48	801,49	676,13
25 g L <sup>-1</sup>	2	747,46	834,41	743,45
	3	883,29	904,83	803,21

Fonte: Autoria própria.

Para compreender de maneira total, foram feitas as médias dos valores de L em função do número da amostra e a média final pela concentração [C]. A Tabela 7 identifica os valores correspondentes à descrição anterior.

**Tabela 7 - Médias da largura da trilha por ensaio e concentração [C] das amostras.**

[C] (g L <sup>-1</sup> ) de alumina	Média de L ( $\mu\text{m}$ ) por amostra nos 3 ensaios	Média final de L ( $\mu\text{m}$ )
0	670,82	691,09
	711,36	
25	775,11	819,44
	863,77	

Fonte: Autoria própria.

No cálculo da taxa de desgaste, levou-se em consideração como principal variável a largura da trilha de desgaste, sendo que a profundidade estará relacionada com a curvatura da esfera de alumina. Assim, com a profundidade e a largura da trilha, encontra-se a área de seção transversal, o que permite calcular os valores do coeficiente de desgaste. A Tabela 8 identifica o volume desgastado e o coeficiente de desgaste em cada concentração [C] de alumina no banho de deposição.

**Tabela 8 - Relação entre concentração [C] de alumina com o coeficiente de desgaste.**

<b>[C] (g L<sup>-1</sup>) de alumina</b>	<b>Volume desgastado (mm<sup>3</sup>)</b>	<b>Coeficiente de desgaste (mm<sup>3</sup>/Nm)</b>
0	0,112318	0,004254
25	0,187267	0,007093

**Fonte: Autoria própria.**

A partir dos resultados da Tabela 8, constata-se que a amostra na condição 25 g L<sup>-1</sup> de alumina possui menor resistência ao desgaste comparada com a sem alumina no banho, pois sua largura da trilha (L) e o coeficiente de desgaste (mm<sup>3</sup>/Nm) apresentam resultados maiores. Correlacionando com o ensaio anterior, pode-se afirmar que nesse caso, quanto maior a dureza, menor o coeficiente de desgaste, por isso as diferenças entre as amostras de 0 e 25 g L<sup>-1</sup> de alumina no banho.

A distância percorrida foi considerada toda distância que a esfera percorreu sobre a superfície (81,64 mm), para um raio da trilha de 13 mm. Para determinação da taxa de desgaste considerou-se que o contra corpo (esfera de alumina) não sofreu desgaste, mantendo sua circularidade.



## 6 CONCLUSÕES

- Foi possível constatar a inserção de alumina na eletrodeposição, pois na leitura efetuada por meio da técnica EDS verificou-se a presença de alumínio e oxigênio nas amostras submetidas a 25 e 50 g L<sup>-1</sup> no banho eletrolítico.

- Ao observar o que ocorreu nas amostras com 75 g L<sup>-1</sup> de alumina pela mesma técnica, uma ausência de alumínio e oxigênio no revestimento também foram constatadas, divergindo do resultado esperado.

- Por fatores que diminuem a precisão da leitura dos resultados (a densidade de corrente não uniforme nas amostras, a difícil diluição total dos sais e a ausência do controle térmico), não se pode afirmar diretamente que na condição de 75 g L<sup>-1</sup> de alumina no banho seria uma concentração a qual se obtém a inserção do material compósito no revestimento.

- No ensaio de tribologia, é possível descrever sua configuração como desgaste abrasivo por riscamento, ao passo que no revestimento também se observa o desgaste abrasivo, por causa dos sulcos (ou riscos) deixados no interior das trilhas no sentido do deslizamento. Também pode-se afirmar que ocorreu desgaste adesivo devido a regiões de deformação plástica que ocorreram nas trilhas, com trincas perpendiculares também ao sentido do deslizamento.

- Aumentando a concentração de alumina, verificou-se também o aumento da dureza, sendo possível a quantificação de seus valores através do ensaio de dureza.

- As consequências do aumento da dureza foram visivelmente observadas com o aumento da resistência ao desgaste e grande deslocamento do revestimento.

## REFERÊNCIAS

- AMORIM, H. J. de. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul. 2002.
- BADARULZAMAN, N. A. et al. The production of nickel – alumina composite coating via electroplating. **Ionics**. v. 15, n. 5, p. 603-607, 2009. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11581-008-0307-z>>. Acesso em: 1 de jul. 2021.
- BALDWIN, K. R.; ROBINSON, M. J.; SMITH, C. J. E. The corrosion resistance of electrodeposited zinc-nickel alloy coatings. **Corrosion science**. v. 35, n. 5-8, p. 1267-1272, 1993. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0010938X9390347J>>. Acesso em: 1 nov. 2020.
- BARBANO, E. P. et al. ESTUDO DA ELETRODEPOSIÇÃO DE Fe-Mo. In: **SIBAE**, XIX, São Carlos - SP, Universidade de Alcalá de Henares, 2010, 402, p. 94. Disponível em: <<https://rsequelectroquimica.files.wordpress.com/2012/11/2010-libro-abstracts1.pdf>>. Acesso em: 1 nov. 2020.
- BATES, J. A. Comparison of alkaline Zn-Ni & acid Zn-Ni as a replacement coating for cadmium. **Plating and surface finishing**, v. 81, n. 4, p. 36-40, 1994.
- BENETTI, P. et al. INVESTIGAÇÃO DA ELETRODEPOSIÇÃO DE FILMES DE ÓXIDOS DE NÍQUEL E NÍQUEL/COBALTO. In: **SIBAE**, XIX. São Carlos - SP, Universidade de Alcalá de Henares, 2010, 402 p. 327. Disponível em: <<https://rsequelectroquimica.files.wordpress.com/2012/11/2010-libro-abstracts1.pdf>>. Acesso em: 12 jul. 2020.
- BERTOL, Helton Claudio. **Determinação de critérios para aceitação de medições de dureza realizadas com durômetros portáteis em regiões de soldas**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul. 2009. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/21396>>. Acesso em: 14 jul. 2021.
- BIN-SHI, Xu et al. Fretting wear-resistance of Ni-base electro-brush plating coating reinforced by nano-alumina grains. **Materials Letters**, v. 60, n. 5, p. 710-713, 2006. Disponível em: <Fretting wear-resistance of Ni-base electro-brush plating coating reinforced by nano-alumina grains - ScienceDirect>. Acesso em: 12 ago. 2021.
- BOWDEN, C.; MATTHEWS, A. A study of the corrosion properties of PVD Zn-Ni coatings. **Surface and Coatings Technology**. v. 76, p. 508-515, 1995. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0257897295026061>>. Acesso em: 1 nov. 2020.
- BROOKS, I.; ERB, U. Hardness of electrodeposited microcrystalline and nanocrystalline  $\gamma$ -phase Zn-Ni alloys. **Scripta Materialia**. v. 5, n. 44, p. 853-858, 2001. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359646200006801>>. Acesso em: 10 nov. 2020.

CELIS, J.; ROOS, J. R.; BUELENS, C. A mathematical model for the electrolytic codeposition of particles with a metallic matrix. **Journal of the Electrochemical Society**, v. 134, n. 6, p. 1402, 1987. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1.2100680/meta>>. Acesso em 25 ago. 2021.

DE OLIVEIRA, I. S.; MARQUES, V. F.; CASSELLI, MAIA, D. S. Avaliação da microdureza e da rugosidade de compósitos resinosos de uso direto e indireto. **Revista da Faculdade de Odontologia-UPF**, v. 20, n. 1, 2015. Disponível em: <<http://seer.upf.br/index.php/rfo/article/view/4410>>. Acesso em 26 ago. 2021.

DIAS, P. B. Desenvolvimento de compósito particulado porcelanato/epóxi para revestimento anti-erosivo em dutos. **Campos dos Goytacazes: UENF**, 2007.

DUTRA, C. A. M.; et al. Estudo da corrosão de eletrodepósitos de Zn e Zn-Ni obtidos a partir de banhos alcalinos. In: **INTERCORR: ABRACO**, 2012, Salvador/BA, maio de 2012. Disponível em: <[https://abraco.org.br/src/uploads/intercorr/2012/INTERCORR2012\\_13.pdf](https://abraco.org.br/src/uploads/intercorr/2012/INTERCORR2012_13.pdf)>. Acesso em: 20 jun. 2020.

FILHO, O. A.; **Soluções inovadoras em revestimentos compósitos**. Disponível em: <[http://www.tecnologiademateriais.com.br/mt/2009/cobertura\\_paineis/painelambientes/apresentacoes/reicholld.pdf](http://www.tecnologiademateriais.com.br/mt/2009/cobertura_paineis/painelambientes/apresentacoes/reicholld.pdf)>. Acesso em: 25 out. 2020.

FINI, M. H.; AMADEH, A. Improvement of wear and corrosion resistance of AZ91 magnesium alloy by applying Ni–SiC nanocomposite coating via pulse electrodeposition. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, v. 23, n. 10, p. 2914-2922, 2013. Disponível em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1003632613628149>>. Acesso em: 13 nov. 2020.

GEMELLI, E.; **Corrosão de Materiais Metálicos e sua Caracterização**, 1a. ed.; LTC: Rio de Janeiro, Brasil, 2001.

GENTIL, V. **Corrosão**. 6. ed. Rio de Janeiro: Grupo Gen - Ltc, 2011. p. 376.

GHAZIOF, S.; GAO, Wei. Zn–Ni–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano-composite coatings prepared by sol-enhanced electroplating. **Applied Surface Science**, v. 351, p. 869-879, 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433215013434>>. Acesso em: 10 out. 2020.

GROOVER, M. P. **Fundamentos da moderna manufatura**. Tradução Givanildo Alves dos Santos, Luiz Claudio de Queiroz. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017. v. 2.

GUIMARAES, R. M. **Avaliação da dureza e do desgaste do TiO<sub>2</sub> em filmes eletrodepositados sobre a liga Ti6Al4V para uso ortopédico**. 2017. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel - Engenharia de materiais) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, [S. l.], 2017. Disponível em: <[http://www.demat.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/25/2018/06/TCCII\\_Rafael-Melo-Guimar%C3%A3es-2.2017.-Prof.-Wellington.pdf](http://www.demat.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/25/2018/06/TCCII_Rafael-Melo-Guimar%C3%A3es-2.2017.-Prof.-Wellington.pdf)>. Acesso em: 18 out. 2020.

HAMMAMI, O.; DHOUBI, L.; TRIKI, E. Influence of Zn–Ni alloy electrodeposition techniques on the coating corrosion behaviour in chloride solution. **Surface and**

**Coatings Technology**, v. 203, n. 19, p. 2863-2870, 2009. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897209002266>>. Acesso em: 30 set. 2021.

HIGASHI, K.; HAYASHI, Y. et al. **A fundamental study of corrosion-resistant zinc-nickel electroplating**. Nickel Development Institute, Technical Series No 10036, Feb. 1990. Disponível em: <[https://www.nickelinstitute.org/media/1822/studyofcorrosion\\_resistantzinc\\_nickelelectroplating\\_10036\\_.pdf](https://www.nickelinstitute.org/media/1822/studyofcorrosion_resistantzinc_nickelelectroplating_10036_.pdf)>. Acesso em 7 de jun. 2020.

JUNIOR, V. J. S.; **Estudo de corrosão por pites em superfície de aço 15-5 PH** – 2016. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel - Engenharia de materiais) – Universidade Estadual Paulista – UNESP, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/156859/000904978.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 22 jun. 2020.

JUNIOR, W. M.; DE MELLO, J. D. B. Superposição de endentações na simulação do desgaste abrasivo, **16º POSMEC da Faculdade de Engenharia Mecânica da universidade Federal de Uberlândia**, 2006.

KIELING, V. C. Parameters influencing the electrodeposition of Ni-Fe alloys. **Surface and Coatings Technology**, v. 96, n. 2-3, p. 135-139, 1997. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0257897297000789>>. Acesso em: 25 out. 2020.

KIM, H.; et al. A novel electrodeposition process for plating Zn-Ni-Cd alloys – **Journal of Electrochemical Society**, v. 150, p.81, 2003. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1.1534599>>. Acesso em 04 de jun. 2020.

LETA, F. R. et al. **Medição de identações de dureza com algoritmos de visão computacional e técnicas de decisão com incertezas**. UFF/IPM Engevista, v.6, n.2, p. 15-35, Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <<https://periodicos.uff.br/engevista/article/view/8761>>. Acesso em 20 set. 2021.

MAHIDASHTI, Z.; ALIOFKHAZRAEI, M.; LOTFI, N. Review of nickel-based electrodeposited tribo-coatings. **Transactions of the Indian Institute of Metals**, v. 71, n. 2, p. 257-295, 2018. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s12666-017-1175-x>>. Acesso em: 10 out. 2021.

MARTINEZ, J. C. C. M. **Avaliação da resistência ao desgaste à corrosão de moedas revestidas de cobre e bronze**. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio de Janeiro - UERJ. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <<https://www.metalmat.ufrj.br/index.php/br/pesquisa/producao-academica/teses/2004/79--70/file>>. Acesso em: 4 out. 2021.

MAUTONE, A.; **Estudo da eletrodeposição do Zinco à partir de soluções que contém baixas concentrações deste metal e Cianeto**. Tese – Ministério da Educação e Cultura do Rio Grande do Sul – Escola de Engenharia. Porto Alegre – RS, p. 3, 1976. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/193251/000394082.pdf?sequence=1>>. Acesso em 7 de jun. 2020.

MELO, R. L. **Eletródeposição, Caracterização e Estudos de Corrosão de Camadas de Ni-Mo-P**. Dissertação de mestrado – Departamento de Química Orgânica e Inorgânica, curso de Pós-Graduação em Química Inorgânica. Fortaleza – Ceará, 2009. Disponível em: <<http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/9606>>. Acesso em 15 set. 2021.

MENEZES, T. L. **Elaboração e caracterização de revestimentos compósitos de zinco com talco e bentonita. Dissertação de mestrado** – Programa de Pós-graduação em Engenharia de minas, metalúrgica e de materiais (PPGEM) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre- RS, 2008. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/21256>>. Acesso em 25 jul. 2021

MARQUES, A. S. **Caracterização e avaliação tribológica de revestimentos depositados via HVOF em ferramentas de aço SAE H13 utilizadas na extrusão a quente**. Tese de doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2019.

MINATTO, F. D. et al. Estudo de composições cerâmicas à base de alumina e vitrocerâmico do sistema LZSA para obtenção de estruturas multicamadas por tape casting. **Cerâmica**, v. 63, n. 366, p. 178-186, 2017. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/ce/a/TtSj8ZZnLjwhM3bc9Ct6Hpn/?format=html>>. Acesso em 24 jul. 2021

NETO, E. F.; KIMINAMI, R. H. G. A. Avaliação da resistência ao desgaste de aluminas nanométricas produzidas a partir da decomposição térmica de acetato de alumínio liofilizado (Evaluation of wear resistance of nanometric aluminas produced by thermal decomposition of lyophilized aluminum acetate). **Cerâmica**, v. 53, n. 328, p. 411-416, 2007. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ce/v53n328/a1253328.pdf>>. Acesso em: 7 dez. 2020.

OLIVEIRA, A. L. M. et al. Studies on electrodeposition and characterization of the Ni–W–Fe alloys coatings. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 619, p. 697-703, 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838814022245>>. Acesso em: 15 nov. 2020.

OLIVEIRA, J. A. M. et al. Effect of current density and pH in obtaining the Ni-Fe alloy by electrodeposition. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 22, n. 1, 2017. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rmat/v22n1/1517-7076-rmat-22-01-e11773.pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2020.

PAGOTTO JR, et al. Zn–Ni alloy deposits obtained by continuous and pulsed electrodeposition processes. **Surface and Coatings Technology**, v. 122, n. 1, p. 10-13, 1999. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897299004016>>. Acesso em: 15 nov. 2020.

PEDROZA, G. A. G. et al. Evaluation of the effect of deposition bath glycerol content on zinc–nickel electrodeposits on carbon steel. **Surface and Coatings Technology**, v. 206, n. 11-12, p. 2927-2932, 2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897211012345>>. Acesso em: 10 nov. 2020.

PEREIRA, N. F. S. Análise do comportamento do par tribológico aço fundido alto C e alto Si contra o metal duro com e sem revestimento de TiN. **Journal of Experimental Techniques and Instrumentation**, v. 4, n. 01, p. 52-66, 2020.

PONTE, H. A. **Fundamentos da eletrodeposição**: Introdução. Departamento de Tecnologia Química, Universidade Federal do Paraná, 1999. Disponível em: <<http://www.gea.ufpr.br/arquivos/lea/material/Fundamentos%20da%20Eletrodeposicao.pdf>>. Acesso em 27 de jun. 2020.

PRAVEEN, B. M.; VENKATESHA, T. V. Electrodeposition and corrosion resistance properties of Zn-Ni/TiO<sub>2</sub> nano composite coatings. **International Journal of Electrochemistry**, v. 2011, 2011. Disponível em: <<https://www.hindawi.com/journals/ijelc/2011/261407/>>. Acesso em: 12 ago. 2021.

QUEIROGA, R. A.; et al. Revestimentos metálicos obtidos por eletrodeposição: uma revisão da literatura. In: II Simpósio do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM. **Anais**. Campina Grande – Paraíba, 2018. Disponível em: <[https://ppgem.ufcg.edu.br/arquivos/Sipgem2018/anais/12\\_Artigo%20-%20SiPGEM2018%20Ra%C3%ADssa%20\(visto\).pdf](https://ppgem.ufcg.edu.br/arquivos/Sipgem2018/anais/12_Artigo%20-%20SiPGEM2018%20Ra%C3%ADssa%20(visto).pdf)>. Acesso em: 11 de jun. 2020.

RAMANATHAN, L. V. Corrosão e seu controle. São Paulo, SP: **Hemus**, 1988.

ROBOTIN, B. et al. Nickel recovery from electronic waste II Electrodeposition of Ni and Ni-Fe alloys from diluted sulfate solutions. **Waste management**, v. 33, n. 11, p. 2381-2389, 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X13002584>>. Acesso em 15 de jun. 2020.

RODRIGUES, R. A. et al. Análise da microdureza Knoop de quatro tipos de resina composta através do microdurômetro HVS-1000. **Odontologia Clínico-Científica (Online)**, v. 9, n. 1, p. 55-58, 2010. Disponível em: <[http://revodonto.bvsalud.org/scielo.php?pid=S1677-38882010000100010&script=sci\\_arttext](http://revodonto.bvsalud.org/scielo.php?pid=S1677-38882010000100010&script=sci_arttext)>. Acesso em 15 de jun. 2020.

RODRIGUES, S. B. et al. Polímero de MMA para base de dentadura com a adição de subnitrito de bismuto. **Revista da Faculdade de Odontologia-UPF**, v. 19, n. 2, 2014. Disponível em: <<http://seer.upf.br/index.php/rfo/article/view/3641>>. Acesso em 15 de jun. 2020.

ROVENTI, G.; et al. Normal and anomalous codeposition of Z-Ni alloys from chloride bath. **Journal of Applied Electrochemistry** v. 30: p. 173-179, 2000. Disponível em: <<https://link.springer.com/content/pdf/10.1023/A:1003820423207.pdf>>. Acesso em 8 de jun. 2020.

SÁNCHEZ, F. A. L. et al. Obtenção de um revestimento compósito de poliéster-uretano reforçado com alumina pela técnica de deposição por imersão sobre fibras de poliamida 6. **Cerâmica**, v. 55, p. 379-384, 2009. Disponível em: <<https://www.scielo.br/pdf/ce/v55n336/07.pdf>>. Acesso em: 08 out 2020.

SANTANA, R. A. C.; PRASAD, S.; SANTANA, F. S. M. Revestimento eletrolítico com uma liga amorfa de Ni-WB, resistente à corrosão e ao desgaste. **Eclética Química**, v. 28, p. 69-76, 2003. Disponível em: <<https://www.scielo.br/pdf/eq/v28n1/a09v28n1.pdf>>. Acesso em 28 jun. 2020.

SEGALA, K. **Efeito de surfatantes na eletrodeposição de gálio em meios de KOH 5, 0 mol/l-1 e NaOH 5 mol/l-1**. 2003. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Disponível em: <[https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/46/46132/tde-06022018-104500/publico/KAREN\\_SEGALA\\_MESTRADO.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/46/46132/tde-06022018-104500/publico/KAREN_SEGALA_MESTRADO.pdf)>. Acesso em: 30 jun. 2020.

SEPTIMIO, R. S. **Estudo das ligas dos sistemas Bi-Zn e Zn-Al-Bi para aplicações tecnológicas**. 2019. 1 recurso online (303 p.). Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP. Disponível em: <<http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/334492>>. Acesso em: 30 jun. 2020.

SHACKELFORD, J. F. *Ciência dos Materiais*. 6. ed. Sorocaba: Person, 2011.

SHEU, H. H. et al. Investigation on the corrosion resistance of trivalent chromium conversion passivate on electroplated Zn–Ni alloy. **Surface and Coatings Technology**, v. 305, p. 241-248, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897216307757>>. Acesso em: 10 out. 2018.

SILVA, C. H. et al. Estudo da influência das características do contra-corpo na taxa de desgaste do polioximetileno em ensaio pino-contra-disco. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, v. 18, n. 1-2, p. 87-94, 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.mec.pt/pdf/ctm/v18n1-2/18n1-2a13.pdf>>. Acesso em: 29 nov. 2018.

SILVA, L. A. S.; **Avaliação da resistência à corrosão de revestimentos comerciais alternativos ao cádmio** – Tese Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 2001. Disponível em: <<https://www.metalmat.ufrj.br/index.php/br/pesquisa/producao-academica/dissertacoes/2001-1/630--579>>. Acesso em: 21 jun. 2020.

SILVA, M. M. P. **Efeito de surfatantes aniônicos e catiônicos no comportamento eletroquímico de interfaces metal/soluções aquosas de cloreto de sódio**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/46/46132/tde-14102006-154531/publico/TeseMauricioMPSilva3aa.pdf>>. Acesso em: 15 jun. 2020.

SILVA, R. C. SIMONI, J. A.; - Avaliação da capacidade tamponante – um experimento participativo. **Química Nova** – UNICAMP, 23, 1999. Disponível em: <<https://www.scielo.br/pdf/qn/v23n3/2828.pdf>>. Acesso em 15 de jun. 2020.

SILVA, T. T. L. **Manufatura e caracterização de ligas de alumínio-cobre (Duralumínio) fabricadas via técnicas de metalurgia do pó**. 2017. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco - PE.

SOARES, M. E. **Influência da gelatina e da vazão do banho de deposição nas propriedades dos eletrodepósitos da liga zinco-níquel**. 2001 Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos – SP, 2001.

SOPRANO, V. **Estudo de parâmetros para ensaios de microdureza em amálgama de prata, resina composta, dentina e esmalte bovinos**. 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo – SP, 2007.

SOUSA, Mikarla Baía de et al. Estudo da caracterização da liga Cu-Zn-Ni obtida pelo processo da eletrodeposição. 2015.

SOUZA, R. O. A.; et al - Avaliação da dureza Vickers de resinas compostas de uso direto e indireto – **Brazilian Dental Science**, 12 (1) – 23-30, 2009. Disponível em: <<https://ojs.ict.unesp.br/index.php/cob/article/view/249>>. Acesso em: 20 jun 2020.

SPERB, A. L. F. **Caracterização da Liga Zinco-Níquel Eletrodepositadas a partir de Solução de Cloreto**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/3042/000380901.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 5 de nov. 2018.

STRNAD, G.; JAKAB-FARKAS, L. Improving the accuracy of low-load Vickers microhardness testing of hard thin films. **Procedia Technology**, v. 12, p. 289-294, 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212017313006737>>. Acesso em: 23 nov. 2018.

THURBER, C. R.; Electrodeposition of Cu–Ni Composite Coatings. **Intechopen**, v. Electrodeposition of Composite Materials, 2016. Disponível em: <<https://www.intechopen.com/books/electrodeposition-of-composite-materials/electrodeposition-of-cu-ni-composite-coatings>>. Acesso em: 20 nov. 2018.

TOMACHUK, C. R.; COSTA, I. Revestimentos de zinco sobre aços e suas aplicações. **Corrosão e Proteção**, ed. 59, 26-33, outubro, 2015.

TORRES, C. S. **Eletrodos para produção de hidrogênio por eletrólise a partir da glicerina e sacarose**. Tese – Programa de pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de materiais. Universidade federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

TREVISAN, D. C. N.; **Análise do comportamento do desgaste em um sistema pino-disco através de ensaios experimentais combinada com avaliação de pressão de contato por meio de simulação numérica** – 2013. 124f., TCC (graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013. Disponível em: <[http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/6402/1/CT\\_COEME\\_2012-2\\_16.pdf](http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/6402/1/CT_COEME_2012-2_16.pdf)>. Acesso em: 15 jun. 2020.

WINAND R.; Electrodeposition of metals and alloys - new results and perspectives **Elselvier** v. 39 ed. 8-9 p. 1091-1105, 1994. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0013468694E0023S>>. Acesso em: 5 nov. 2018.

ZHENG, H.; A., M. Electrodeposition of Zn–Ni–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposite coatings under ultrasound conditions. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 459, n. 1-2, p. 548-552, 2008. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838807012133>>. Acesso em: 10 out. 2021.